

FERNANDO MERES VALADÃO

**PONDERAÇÕES TOPOLÓGICAS PARA MODELAGEM DE SISTEMAS
MULTIFONTES EM CONSUMIDORES INDUSTRIAIS E COMERCIAIS.**

São Paulo

2024

FERNANDO MERES VALADÃO

**PONDERAÇÕES TOPOLÓGICAS PARA MODELAGEM DE SISTEMAS
MULTIFONTES EM CONSUMIDORES INDUSTRIAIS E COMERCIAIS.**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como a obtenção do título de Mestre em
Ciências

São Paulo

2024

FERNANDO MERES VALADÃO

**PONDERAÇÃO TOPOLÓGICA PARA MODELAGEM DE SISTEMAS
MULTIFONTES EM CONSUMIDORES INDUSTRIAIS E COMERCIAIS**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como a obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração:

Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Miguel Edgar
Morales Udaeta

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.	
São Paulo, 22	de Maio de 2024
Assinatura do autor:	<u>Fernando Meres Valadão</u>
Assinatura do orientador:	_____

Catálogo-na-publicação

<p>Valadão, Fernando Meres PONDERAÇÕES TOPOLÓGICAS PARA MODELAGEM DE SISTEMAS MULTIFONTES EM CONSUMIDORES INDUSTRIAIS E COMERCIAIS. / F. M. Valadão -- versão corr. -- São Paulo, 2023. 100 p.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.</p> <p>1.Sistemas de armazenamento de energia 2.Microrredes 3.Soluções energéticas do lado da demanda 4.Topologias de sistemas multifontes I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.</p>
--

DEDICATÓRIA

Para aqueles que sempre me incentivaram, em especial, pai e mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Professor Miguel Edgar Morales Udaeta por compartilhar seus conhecimentos e me incentivar a trabalhar na área de sistemas elétricos de potência, visando desenvolvimento sustentável desde o meu trabalho de graduação. Obrigado pela compreensão e paciência no momento mais difícil que já vivenciei até hoje.

Agradeço meu pai Fábio Taveira Valadão, foi quem me ensinou a estudar e sempre buscar novos conhecimentos, a crescer com humildade. Com certeza você estaria presente neste dia, falando suas ideias e me ajudando a melhorar como profissional e ser humano.

Às pessoas que fazem parte da minha vida diariamente, mãe Vera Lúcia Ferreira Meres, irmão Felipe Meres Valadão e a Viviane dos Santos Oliveira, que sabem o quanto me esforcei para finalizar o trabalho.

Não posso me esquecer do meu amigo Vinícius com quem comecei a conviver em Ilha Solteira e fazia as sextas-feiras do segundo semestre de 2011 serem grandes eventos contando alguns de seus casos. Além de contribuir imensamente com o meu trabalho de graduação, dissertação de mestrado e pesquisa.

Aos amigos

Coloco também nos meus agradecimentos toda a equipe do GEPEA pelo apoio durante os trabalhos e a paciência nas atividades.

Aos amigos da sala AN16 que proporcionaram momentos de descontração no ambiente de trabalho e estudo.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é definir um modo para orientar a escolha de uma topologia de sistema multifontes com armazenamento de energia como uma solução energética para consumidores do sistema de distribuição. Os recursos distribuídos vêm se desenvolvendo ao longo dos anos e mais recentemente o incremento do armazenamento de energia tornou-se foco de diversas análises. Por isso, é importante estabelecer um modelo orientativo para definir os melhores arranjos para atendimento da demanda. Como elementos metodológicos, esse trabalho conta com (i) o levantamento do estado da arte dos sistemas de armazenamento de energia, levando em conta as tecnologias disponíveis, e as possíveis aplicações e com (ii) a caracterização das topologias com baterias por meio da análise de estudos de caso encontrados na bibliografia e projeto piloto de rede multifontes com armazenamento de energia. Essas etapas de pesquisa dão o embasamento teórico para a identificação dos parâmetros adotados no modelo desenvolvido. Os parâmetros devem ser observados para auxiliar tecnicamente na escolha da topologia e operação de sistemas multifontes. Os conceitos observados no levantamento bibliográfico, utilizados para criar análise proposta para direcionamento de topologia de sistema multifontes, são aplicados em um projeto piloto numa unidade consumidora comercial no Brasil, com a finalidade de validar o objetivo desse trabalho. A sistematização proposta pode ser base para futuras aplicações em estudos com recursos energéticos incluindo armazenamento de energia com foco em medidas para consumidores comerciais e industriais, grande nicho de mercado a ser explorado para esse tipo de solução.

Palavras-Chave - Sistemas de armazenamento de energia, Microrredes, Soluções energéticas do lado da demanda, Topologias de sistemas multifontes.

ABSTRACT

The objective of this work is to define a model to guide the choice of a multi-source system topology with energy storage as an energy solution for consumers in the distribution system. Distributed resources have been developed over the years and more recently the increase in energy storage has become the focus of several analyses. Therefore, it is important to establish a guiding model to define the best arrangements for meeting demand. As methodological elements, this work includes (i) a survey of the state of the art of energy storage systems, taking into account available technologies and possible applications and (ii) the characterization of battery topologies through analysis of case studies found in the bibliography and pilot project of a multi-source network with energy storage. These research steps provide the theoretical basis for identifying the parameters adopted in the developed model. The parameters must be observed to technically assist in choosing the topology and operation of multisource systems. The concepts observed in the bibliographic survey, used to create a proposed analysis for directing the topology of a multisource system, are applied in a pilot project in a commercial consumer unit in Brazil, with the purpose of validating the objective of this work. The proposed systematization can be the basis for future applications in studies with energy resources, including energy storage with a focus on measures for commercial and industrial consumers, a large market niche to be explored for this type of solution.

Keywords - Energy storage systems, Microgrids, Demand-side energy solutions, multi-source system topologies.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

AT – Alta Tensão

BESS – *Battery Energy Storage System* – Sistema de Armazenamento de Energia à Baterias

BT – Baixa Tensão

CA – Corrente Alternada

DC – Corrente Contínua

DoD – Dept of Discharge – Profundidade de descarga

ESS – *Energy Storage System* – Sistema de Armazenamento de Energia

EMS – *Energy Management System* - Sistema de Gerenciamento de Energia

GMG - Grupo Motor-Gerador

PCS – *Power Conversion System* – Sistema de Conversão de Energia

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SoC – *State of Charge* – Estado da Carga da Bateria

STATCOM – Compensador Síncrono Estático

VRLA, em inglês *Valve regulated lead-acid*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação de microrrede	13
Figura 2: Tempo de descarga versus Faixa de potência das tecnologias de armazenamento. .	15
Figura 3: Comparação entre densidade de potência e densidade de energia para as tecnologias de armazenamento de energia.....	16
Figura 4: Princípio de funcionamento da bateria de chumbo ácido	18
Figura 5: Estrutura de uma bateria de chumbo ácido regulada por válvula	20
Figura 6: Mecanismo de operação de uma bateria de fluxo de vanádio.....	27
Figura 7: Circuito Equivalente de uma Bateria	31
Figura 8: Variação da impedância interna com a temperatura	32
Figura 9: Influência da temperatura na capacidade de armazenamento e vida útil da bateria de chumbo ácido.....	35
Figura 10: Influência da bateria na taxa de auto descarga de uma bateria de íon lítio.....	35
Figura 11: Fluxo de elétrons em uma bateria	37
Figura 12: Curva de descarga para algumas tecnologias de bateria	37
Figura 13: Diferentes taxas de descarga para bateria de íon lítio.....	39
Figura 14: Resumo das Áreas de Atuação dos Sistemas de Armazenamento.....	42
Figura 15: Diferença na variação da frequência, comparando sistema com e sem armazenamento.....	43
Figura 16: Compensador Síncrono Estático com Baterias.....	45
Figura 17: Nivelamento da carga.....	47
Figura 18: Exemplo de gestão de demanda contratada.....	48
Figura 19: Estrutura básica de um sistema de armazenamento.....	50
Figura 20: Diagrama de blocos de um sistema de armazenamento, com sinais de controle e potência.....	51
Figura 21: Esquemas de ligação entre PCS e Bateria.....	53
Figura 22: Estrutura de microrrede com baterias.....	54
Figura 23 – Operação diária de forno de indução em indústria metalmeccânica.....	58
Figura 24 – Perfil de atuação de máquina que produz fios de algodão.....	59
Figura 25 - Fluxograma para definição de um sistema de armazenamento de energia.....	62
Figura 26: Localização do consumidor da unidade piloto.....	63
Figura 27 – Medições de demanda total para dia 11/05/2018, não foi medido o dia todo.....	64
Figura 28 – Medições de demanda total para dia 12/05/2018.....	65

Figura 29 – Medições de demanda total para dia 13/05/2018.....	65
Figura 30 – Medições de demanda total para dia 13/05/2018.....	66
Figura 31 – Medições de demanda total para dia 14/05/2018.....	66
Figura 32 – Medições de demanda total para dia 15/05/2018.....	67
Figura 33 – Medições de demanda total para dia 16/05/2018.....	67
Figura 34 – Medições de demanda total para dia 17/05/2018.....	68
Figura 35 – Medições de demanda total para dia 18/05/2018.....	68
Figura 36: Módulo de controle ST2130 e GMG, presentes na unidade consumidora.	70
Figura 37: Diagrama representativo da instalação elétrica da unidade consumidora.....	71
Figura 38: Diagrama unifilar detalhado da cabine de entrada da alimentação, após o transformador abaixador AT/BT de entrada da unidade consumidora.....	71
Figura 39: Topologia sugerida para a malha multi-fontes.....	74
Figura 40 – Hardware do sistema de armazenamento.....	75
Figura 41 – Ramal de entrada unidade consumidora do consumidor.	79
Figura 42 – Rede multifontes unidade consumidora.	80
Figura 43 – Tela do sistema de gerenciamento de energia (EMS).....	81
Figura 44 – Perfil de demanda do ESS.....	82
Figura 45 – Perfil de demanda do ESS.....	83
Figura 46 – Perfil de demanda do ESS aos sábados.....	84
Figura 47 – Perfil de demanda do ESS aos domingos.....	84
Figura 48 – Perfil de demanda do ESS feriado dia 02/04/2021.	85
Figura 49 – Perfil de demanda do ESS feriado dia 21/04/2021.	86
Figura 50 – Perfil de demanda do ESS , rede e GMG.....	87
Figura 51 – Perfil de demanda do ESS , rede e GMG em 05/04/2021.....	88
Figura 52 – Perfil de demanda do ESS , rede e GMG em 06/04/2021.....	88
Figura 53 – Perfil de demanda do ESS , rede e GMG em 26/04/2021.....	89
Figura 54 – Perfil de demanda do ESS , rede e GMG em 04/05/2021.....	89
Figura 55 – Perfil de demanda do ESS , rede e GMG em 05/05/2021.....	90
Figura 56 – Perfil de demanda das cargas, média minuto a minuto.....	91
Figura 57 – Perfil de potências reativas para cargas (posto em roxo, restaurante em verde), rede (em vermelho) e ESS (em azul).....	92
Figura 58 – Fator de potência, média horária, (posto em roxo, restaurante em verde), rede (em vermelho) e ESS (em azul).....	92

Figura 59 – Estado da carga da bateria, Rack 1 em azul, rack 2 em vermelho.93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens para baterias de chumbo ácido ventiladas.	19
Tabela 2: Vantagens e desvantagens para baterias de chumbo ácido reguladas por válvulas..	19
Tabela 3: Vantagens e desvantagens para as baterias de níquel cádmio	21
Tabela 4: Vantagens e desvantagens das baterias de Níquel Hidretos Metálicos	22
Tabela 5: Características das principais tecnologias de baterias do tipo Íon-Lítio	25
Tabela 6: Vantagens e desvantagens das baterias de sódio enxofre.....	26
Tabela 7: Vantagens e desvantagens para baterias de fluxo de zinco bromo e redox de vanádio	27
Tabela 8: Exemplo de uso da taxa C	30
Tabela 9: Resumo das modalidades tarifárias para consumidores do grupo A.....	57
Tabela 10: Consumo total da unidade durante o horário de ponta de 11/05/2018 a 17/05/2018	69
Tabela 11: Posto tarifário a que o consumidor pertence.	72
Tabela 12: definição da capacidade de armazenamento de energia da bateria.	73

SUMÁRIO

RESUMO	7
1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1. APRESENTAÇÃO AO TEMA.....	8
1.2. OBJETIVO	9
1.3. METODOLOGIA.....	9
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	10
2. CONTEXTUALIZAÇÃO	10
2.1. MICROREDES E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	11
2.1.1. Geração Distribuída.....	11
2.1.2. Redes de Distribuição Ativas	12
2.1.3. Microrredes	13
3. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	15
3.1. ESTADO DA ARTE DAS TECNOLOGIAS DAS BATERIAS.....	16
3.1.1. Principais Tecnologias	17
3.1.2. Chumbo Ácido	17
3.1.3. Níquel Cádmio	20
3.1.4. Níquel Hidretos Metálicos (NiMH)	21
3.1.5. Íon Lítio.....	23
3.1.6. Lítio Polímero	25
3.1.7. Sódio Enxofre.....	26
3.1.8. Fluxo Regenerativo	27
3.1.9. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA BATERIAS	29
3.1.9.1. Especificações Elétricas	29
Tensão.....	29
Corrente	29

Capacidade de fornecimento de corrente (Ampere-hora para uma Taxa C – “C RATE”) ...	30
Energia Nominal (Wh)	30
Potência Nominal (W)	30
Impedância interna	31
Parâmetros Adicionais	32
Profundidade de Descarga	32
Condições Ambientais	33
Tempo de reação.....	33
Dimensão e Peso.....	33
3.1.9.2. PARÂMETROS PARA MONITORAR O ESTADO DA BATERIA.....	34
ESTADO DA CARGA (<i>STATE OF CHARGE</i> – SOC).....	34
ESTADO DE SAÚDE (<i>STATE OF HEALTH</i> – SOH)	34
ESTADO DA FUNÇÃO	34
Ciclo de vida.....	35
Efeitos da Temperatura.....	35
3.1.9.3. PROCESSOS DE OPERAÇÃO.....	36
PROCESSO DE DESCARGA	36
Curvas de Descarga	37
Taxas de descarga.....	38
Autodescarga	39
Processo de Carga.....	39
Métodos Básicos de Carregamento	40
Corrente Constante	40
Tensão Constante.....	41
Tensão e Corrente constantes	41
Carregamento por Pulso	41

Carregamento por Pulso Negativo.....	41
Carregamento em Gotejamento	42
Carga Flutuante	42
3.1.10. Aplicações dos Sistemas de Armazenamento Eletroquímicos	42
Regulação de Frequência.....	43
Suporte de tensão.....	44
Controle de Energia Reativa.....	44
Suavização de Transitórios.....	45
Reserva de Energia	45
Auxílio na Partida de Máquinas Geradoras	46
Postergação dos Investimentos de Infraestrutura da Rede Elétrica.	46
Alívio no Congestionamento dos Sistemas de Transmissão e Distribuição.....	46
Nivelamento de Carga	47
Gestão de Demanda Contratada	48
Negociação Arbitrária de Energia	48
Integração com Fontes Renováveis Intermitentes	49
Auxílio em Sistemas Isolados.....	49
4. TOPOLOGIAS DE SISTEMAS MULTIFONOS COM BATERIAS	49
5. SEGMENTAÇÃO DE MERCADO.....	54
5.1. IDENTIFICAÇÃO DE CLIENTES POTENCIAIS	56
5.2. Consumidores INDUSTRIAIS E COMERCIAIS NO BRASIL	56
6. PROCEDIMENTO ORIENTATIVO PARA ELABORAR UMA SOLUÇÃO MULIFONTES.....	59
7. ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO	62
7.1. CARACTERÍSTICAS DO CONSUMIDOR	63
7.2. CARGA INSTALADA E DEMANDA.....	64
7.3. GERADOR A DIESEL	69

7.4.	DIAGRAMAS DA INSTALAÇÃO	70
7.5.	OUTRAS CONSIDERAÇÕES	72
7.6.	Características da Aplicação	72
7.7.	SUGESTÃO DE TOPOLOGIA DA MALHA MULTI-FONTES	73
7.8.	Topologia do sistema multifontes instalado	75
7.8.1.	Hardware do banco de baterias	75
7.8.2.	Softwares – Sistema De Gerenciamento Da Bateria E Gerenciamento De Energia (Battery Management System E Energy Management System)	77
7.8.3.	Sistema Multifontes.....	78
7.8.4.	Resultados Após a Instalação	81
7.8.5.	Considerações.....	93
8.	CONCLUSÕES	94
9.	REFERÊNCIAS	97

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO AO TEMA

Os sistemas elétricos de potência (SEP) têm por finalidade suprir a demanda de energia elétrica dos consumidores com qualidade e confiabilidade. Tradicionalmente são definidos três pilares: Geração, Transmissão, Distribuição. O maior desafio enfrentado é manter o equilíbrio entre geração e consumo de maneira sustentável e segura. Um SEP mal planejado pode ocasionar em falta de energia para os consumidores, defeitos em equipamentos dos consumidores além de frear o crescimento econômico de um país.

Com a nova tendência dos sistemas elétricos de potência, de descentralização da geração, os consumidores se tornam ativos no circuito, podendo consumir e gerar energia. Desta forma, a operação do SEP em geral se torna mais complexa, devido ao fluxo bidirecional existente entre unidades consumidoras com geração distribuída e rede elétrica. Portanto, para se ter um mapeamento completo do fluxo de potência também é necessária a adoção de novas tecnologias de medição, controle e proteção elétrica que estão diretamente ligadas à digitalização, além de atualização de normas e procedimentos de acesso, proteção, tarifação, e remuneração para cada parte do sistema.

Durante esse processo de transição energética, alguns consumidores iniciaram a construção de redes próprias, denominadas microrredes, as quais podem trabalhar de forma isolada da rede básica de fornecimento, ou seja, a unidade consumidora pode se tornar autossuficiente energeticamente, utilizando sua geração própria que pode ser composta por uma ou mais fontes distribuídas, em (CHOWDHURY & CROSSLEY, 2009) são apresentados detalhadamente as características básicas de uma microrrede. Dentro dessa situação, estudos estão se direcionando para introdução de sistemas de armazenamento de energia em baterias eletroquímicas para complementar o sistema de modo geral, podendo ser aplicados em todos os ramos do SEP, inclusive atrás do medidor, do lado da demanda, com funções diversas.

É neste contexto que o trabalho se insere: na etapa de introdução de armazenamento de energia junto ao consumidor, do lado da demanda, observando diversos sistemas multifontes (ou microrrede) com armazenamento de energia como uma solução energética para mitigar os problemas de possíveis faltas do lado da concessionária de energia ou mesmo no sentido de buscar um benefício econômico para o consumidor.

1.2. OBJETIVO

Objetivos gerais: desenvolver um procedimento que estabeleça os conceitos básicos para a aplicação de um sistema multifontes com armazenamento de energia como uma solução energética atrás do medidor, do lado da demanda, a fim de manter a qualidade de energia (parâmetros de tensão, frequência, potência) e possível benefício econômico para a unidade consumidora.

Os objetivos específicos são:

- Identificar as características dos potenciais consumidores interessados na solução proposta;
- Mapear os parâmetros a serem avaliados para a instalação do sistema multifontes, definindo a topologia para atender ao perfil de carga do consumidor;
- Coletar e sistematizar os dados reais de projeto piloto instalado;
- Analisar os dados obtidos do projeto piloto, em busca de melhorias e aperfeiçoamento do sistema instalado, assim como a assertividade do procedimento proposto.

1.3. METODOLOGIA

Primeiramente foi realizado levantamento bibliográfico onde identifica-se os conceitos básicos de sistemas multifontes com armazenamento de energia, que justifica a utilização de tal solução para suprir a carga. A princípio observa-se as seguintes atuações: evitar a queda no fornecimento de energia devido à queda na rede básica, atenuar inconvenientes devido às variações de frequência e tensão, ganho monetário com a utilização de energia, aproveitamento de excedentes de energia de geração própria. Assim, são estudados os tipos de tecnologias disponíveis, os elementos que compõem a solução, parâmetros para preservar e operar, de forma ótima, a bateria e as demais fontes que compõem o sistema e aplicações. É feita análise de algumas topologias de sistema multifontes ao redor do mundo, observando toda a problemática envolvida para cada caso e como a solução multifontes atende às cargas.

A partir disso, o trabalho é direcionado para aplicações atrás do medidor, pois é o público alvo da solução energética, basicamente é quem busca mitigar riscos e custos provenientes do fornecimento de energia elétrica. Assim, desenvolve-se orientações para direcionar as unidades consumidoras a dimensionar seus próprios sistemas multifontes. São elencadas características do consumidor para que a solução seja viável, as aplicações pertinentes e as estratégias de despacho do sistema atendam às necessidades. Com isso, é feito

o procedimento para auxiliar um consumidor a elaborar a topologia multifontes de forma assertiva.

Ademais, é analisado um projeto piloto ao qual o objetivo é instalar um sistema multifontes em um cliente industrial/comercial para verificar o comportamento dos parâmetros energéticos.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho organizado da seguinte forma: Capítulos 2, 3 e 4 compõem o levantamento bibliográfico e embasamento teórico, sendo:

- Capítulo 2 – Introdução teórica e apresentação do contexto de transição dos sistemas elétricos de potência;
- Capítulo 3 – Estado da arte dos sistemas de armazenamento com bateria, exposição de principais tecnologias, parâmetros técnicos e aplicações;
- Capítulo 4 – Composição de um sistema de armazenamento de energia com baterias, exemplo de topologias

No Capítulo 5 é feita análise para identificar as características dos potenciais clientes no mercado Brasileiro e as aplicações mais atrativas para tal nicho consumidores, exemplos de indústrias em que poderia ser aplicado o sistema com baterias. Seguindo no Capítulo 6 o procedimento orientativo que auxilia na montagem de topologia para os consumidores. No Capítulo 7 é apresentado um projeto piloto no qual foi aplicado o procedimento orientativo para instalação de sistema multifontes com armazenamento de energia.

Por fim, nos Capítulos 8 são apresentados as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. O Capítulo 9 apresenta as referências bibliográficas.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

O fornecimento de energia elétrica por meio de grandes usinas geradoras distantes das cargas atende bem às necessidades energéticas, porém, apresenta perdas elétricas, grande impacto ambiental envolvendo degradação da fauna, flora e da própria qualidade de vida humana no entorno de usinas e de linhas de transmissão. No caso de empreendimentos que utilizam combustíveis fósseis, maioria da geração de energia mundial (International Energy Agency, 2023), ainda ocorre a poluição atmosférica com gases que provocam o efeito estufa, o que pode acelerar alterações climáticas ao redor do globo.

Atualmente o tema da expansão energética vem sendo tratado de forma consciente, com foco em sustentabilidade, para preservar o meio ambiente e atenuar as alterações climáticas. Para tanto, os estudos estão a se converter em novas tecnologias e políticas com o objetivo de criar alternativas que complementem toda estrutura já existente, visando ótima utilização de recursos, e assim, benefícios para todo sistema elétrico concomitantemente com o meio ambiente. A seguir são apresentadas algumas ferramentas utilizadas para transição dos sistemas elétricos em busca do desenvolvimento sustentável.

2.1. MICROREDES E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

2.1.1. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Ao redor do mundo, a tendência dos sistemas elétricos de potência é a geração local de energia elétrica em baixos e médios níveis de tensão, através de fontes renováveis como biogás, eólica, fotovoltaica, biomassa, podendo contar com a integração dessas fontes à rede de distribuição para aproveitamento de certa complementaridade que pode ocorrer (EPE E. d., 2024). Esse tipo de disposição de geradores próximos às cargas é denominado geração distribuída. O termo surgiu para diferenciar a geração próxima a carga da geração centralizada. Incorporando esse novo tipo de estrutura à rede de distribuição cria-se uma rede ativa, com transporte bidirecional de eletricidade, deste modo surgiu o termo rede de distribuição ativa. Desde o final dos anos 90, diversos grupos que compõe o Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos pesquisam os impactos envolvendo geração distribuída. De acordo com os vários estudos foram definidos alguns atributos universais, como mostrado em (CHOWDHURY & CROSSLEY, 2009):

- A geração distribuída não é planejada nem despachada de forma centralizada, por um órgão governamental ou agente do setor elétrico distribuidor de energia;
- Geralmente, a potência instalada é inferior a 50MW;
- A conexão das fontes à rede de distribuição é feita entre 220V e 145kV.

Ainda que os sistemas convencionais tenham vantagens e representem a política adotada para utilização dos recursos energéticos, está ocorrendo a transição gradual de diretrizes nesse ramo. A inserção da geração distribuída traz benefícios técnicos, econômicos e ambientais, tais fatores estão incentivando essa transformação. Em (CHOWDHURY & CROSSLEY, 2009) são listados alguns pontos que estão levando a mudar a forma de planejar os sistemas elétricos:

- Aumento da demanda leva a necessidade do acréscimo na geração convencional provocando esgotamento contínuo de reservas de combustíveis fósseis e saturação

das bacias hídricas para construção de grandes empreendimentos hidrelétricos. Assim, grande parte dos países vem optando por fontes renováveis de geração.

- Altos níveis de poluição do meio ambiente e aquecimento global, devido à escala de utilização de combustíveis fósseis, são fatores-chave para utilização de fontes renováveis. A partir de definições feitas no Protocolo de Kyoto, vários países tem planejado reduzir as emissões de gases de efeito estufa a fim de diminuir os impactos ocasionados pela degradação do meio ambiente. Espera-se que a geração distribuída aumente a contribuição das fontes renováveis nas matrizes energéticas provendo energia limpa com menos impacto ambiental.
- A geração distribuída proporciona um cenário favorável para instalações de plantas de cogeração e trigeração que utilizam o calor dos gases exaustos para processos industriais, residenciais ou comerciais. Portanto, com o melhor aproveitamento dos recursos, tem-se aumento na eficiência energética total da planta geradora e redução da poluição do meio ambiente.
- Devido a menor densidade de energia e a proximidade da carga, o investimento e o tempo de implementação dos recursos de geração distribuída são menores. As perdas em transmissão e distribuição também são reduzidas. A geração distribuída pode ser conectada diretamente na carga (baixa tensão) ou interconectada com a microrrede, sendo a microrrede conectada à rede de distribuição, tornando-se uma entidade semiautônoma.
- As plantas de geração distribuída contribuem para o suprimento, qualidade e confiabilidade da energia elétrica de todo o sistema. Um ambiente com livre acesso às redes de distribuição oferece diversas oportunidades de integração para as plantas de geração distribuída. Há países onde a falta de energia é um problema tão sensível que qualquer forma de geração é encorajada para atender a demanda das cargas.

2.1.2. REDES DE DISTRIBUIÇÃO ATIVAS

Os modelos em que o consumidor recebe energia do sistema de energia elétrica por meio de despacho centralizado, fluxo unidirecional de energia e sem qualquer tipo de geração distribuída são considerados redes passivas. Quando são instaladas plantas de geração

distribuída cria-se fluxo de potência bidirecional, em que o lado da demanda também pode fornecer energia para o sistema, tornando a rede de distribuição ativa.

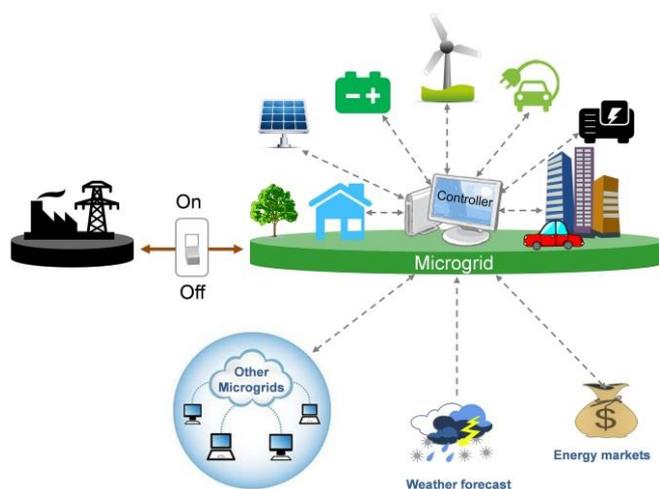
A nova característica apresentada pelas redes de distribuição ativas exigiu o incremento de um sistema de inteligente para controlar e gerenciar o fluxo de energia local e obter o melhor aproveitamento de fontes limpas, inclusive com armazenamento de excedentes gerados em período de baixa demanda para despacho em momentos de pico. Dessa forma, as redes de distribuição ativa em conjunto com tal sistema de gerenciamento caracterizam-se como microrredes e redes inteligentes.

2.1.3. MICRORREDES

Uma microrrede é um conglomerado de geração distribuída e diferentes cargas com tensão no nível de distribuição. As fontes de uma microrrede usualmente são fontes renováveis e atuam de forma integrada para suprir a demanda local. Do ponto de vista operacional tais fontes obrigatoriamente são equipadas com sistema de controle eletrônico que promove a versatilidade necessária para garantir a operação como um sistema agregado único, visando qualidade de energia e total suprimento da carga. O sistema de controle faz o gerenciamento e monitoramento dos recursos presentes a fim de manter a segurança e confiabilidade energética. Quando há excedente de energia, o controlador permite conexão segura entre microrrede e rede básica para escoar tal excesso e nos momentos de déficit de energia a conexão é feita para compensar a o baixo nível de fornecimento energético das fontes locais.

A Figura 1 representa o conceito de microrrede, observa-se a presença de diversas fontes geradoras locais, armazenamento de energia, interconexões com outras microrredes e com a rede básica, tudo gerenciado por um sistema de controle local da microrrede.

Figura 1: Representação de microrrede



Fonte: (Berkeley Lab., s.d.)

(CHOWDHURY & CROSSLEY, 2009) cita algumas diferenças chave entre microrredes e o sistema convencional de energia elétrica:

- As micros e minigerações tem uma capacidade instalada muito menor comparando-as com os grandes empreendimentos geradores dispostos nos sistemas convencionais.
- Como a energia é gerada nos níveis de tensão da distribuição, pode ser injetada diretamente na rede básica distribuidora.
- A proximidade entre fonte e consumidor proporciona maior eficiência no transporte de energia, o que torna os níveis de tensão e frequência satisfatórios e diminui as perdas nas linhas.

As propriedades técnicas de microrredes as tornam adequadas para suprir áreas remotas onde o sistema convencional tem dificuldades de fornecer energia ou manter os níveis básicos de tensão e frequência, devido a interrupções frequentes referentes a condições climáticas ou pela própria curva de carga do sistema.

Do ponto de vista da rede de distribuição, a principal vantagem da microrrede é o alívio do fluxo de potência na infraestrutura instalada. Pode ser operada como um agregado de cargas, o que garante fácil controle e confiabilidade dentro dos parâmetros da rede.

Como as microrredes atendem as demandas locais, beneficiam diretamente o consumidor abastecido. Há maior confiabilidade da rede local e melhores condições no fornecimento de energia.

Por utilizar fontes com baixa emissão de carbono, as microrredes tornam-se mais uma alternativa para redução na emissão de gases de efeito estufa e preservação do meio ambiente.

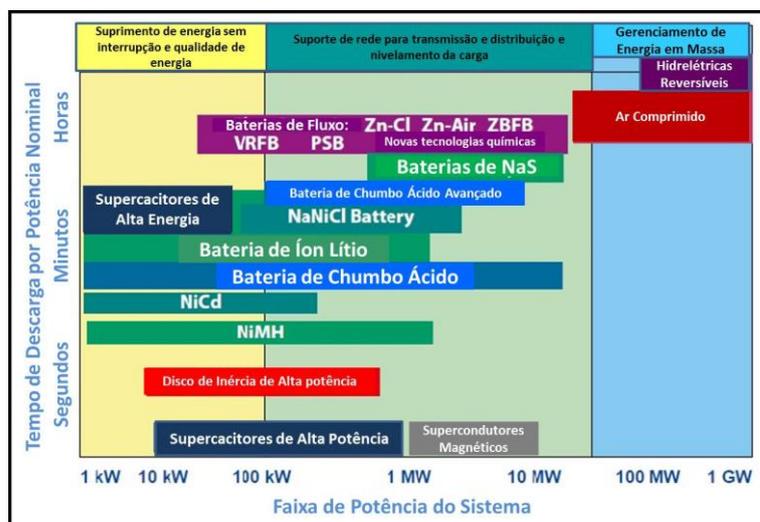
Com todos esses benefícios, ainda há dificuldades para que uma microrrede seja implementada, como a complexidade de gerenciamento das fontes e demais recursos energéticos. A tendência é que com o desenvolvimento das tecnologias (digitalização, medições setorizadas e comandos), novas regulações que incentivem a adoção de microrredes e posterior popularização desses itens, a viabilidade técnica e econômica melhore.

Dentro das microrredes está se consolidando um novo elemento, o armazenamento de energia, em que se destacam os bancos de baterias para atuarem do lado da demanda, como um incremento na solução energética dos sistemas multifontes. No próximo capítulo é apresentado o estado da arte desse novo elemento em destaque.

3. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

As tecnologias de sistemas de armazenamento possuem propriedades intrínsecas diferentes que determinam a aptidão técnica para realizar os serviços para a rede elétrica. Pode-se classificar a aplicação, por exemplo, conforme o tempo de despacho ou pela potência requerida. Há funções que exigem períodos menores de atuação, porém a quantidade de energia injetada é alta, como é o caso dos supercapacitores para manter o padrão de qualidade de energia. Outros procedimentos solicitam grandes períodos de injeção de energia, para promover o nivelamento da carga durante o dia. A Figura 2 mostra a relação de capacidade de armazenamento por tempo de descarga de algumas tecnologias.

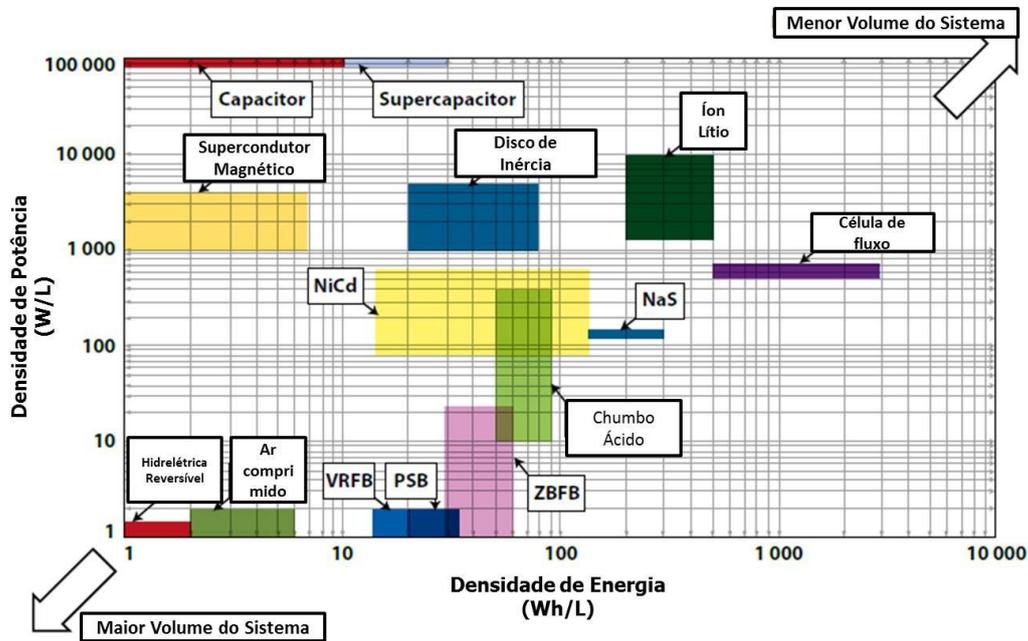
Figura 2: Tempo de descarga versus Faixa de potência das tecnologias de armazenamento.



Fonte: (IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017)

As densidades de potência e de energia são aspectos que também limitam o uso de certos tipos de baterias. A densidade de energia é a quantidade de energia armazenada por unidade de volume (Wh/L) ou por unidade de massa (Wh/kg). Já a densidade de potência é a potência que a bateria pode suprir por unidade de volume (W/L) ou unidade de massa (W/kg). Tais parâmetros mostram que um tipo de bateria pode armazenar mais energia que outro, causando influência nas dimensões físicas dos sistemas de armazenamento de energia e pode restringir a utilização de determinadas tecnologias. A Figura 4 demonstra a relação entre densidade de energia e densidade de potência, com referência à projetos já instalados.

Figura 3: Comparação entre densidade de potência e densidade de energia para as tecnologias de armazenamento de energia



Fonte: (IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017)

A evolução das atuais tecnologias e o surgimento de novas estruturas possivelmente pode alterar esse quadro, tornando as baterias com menor volume e maior densidade. As próximas seções apresentam alguns dos principais tipos de tecnologias e parâmetros de análise.

3.1. ESTADO DA ARTE DAS TECNOLOGIAS DAS BATERIAS

As células de bateria são a menor unidade eletroquímica de armazenamento, a bateria é constituída por um grupo de células interligadas. As características de uma bateria variam de acordo com sua com estrutura química: por exemplo, a tensão de uma célula de níquel é em torno de 1,2 V, já para uma célula de lítio, a tensão gira em torno de 3V (Woodbank Communications Ltd, s.d.).

No que se refere à disponibilidade de cargas, a classificação das células pode ser feita em dois grupos: células não recarregáveis (primária) e recarregáveis (secundária) (Woodbank Communications Ltd, s.d.). Ambos os grupos fornecem tensão em corrente contínua (DC), porém as primárias possuem apenas um ciclo de descarga - não é possível sua reutilização como fonte de energia- e são utilizadas em baterias para equipamentos de baixa potência. As células secundárias possuem diversos ciclos de descarga, e com auxílio de uma fonte de tensão, podem ser recarregadas. Nas aplicações de rede elétrica são utilizadas apenas baterias secundárias justamente por ocorrer diversas operações de descarga.

A estrutura básica de uma célula de bateria é composta por:

- **Anodo:** é o eletrodo negativo, exporta elétrons para o circuito externo durante um processo de descarga. Geralmente é composto por um metal.
- **Cátodo:** é o eletrodo positivo, recebe elétrons do circuito externo durante um processo de descarga. Geralmente é composto por um óxido metálico ou um sulfeto, sempre presente o elemento químico oxigênio.
- **Eletrólito:** é o condutor de íons, ou seja, é o meio em que ocorre o conjunto de reações químicas para carga e descarga da bateria. Tipicamente composto por um solvente contendo elementos químicos dissolvidos que fornecem condutividade iônica.
- **Separador:** membrana ou material que isola eletricamente os eletrodos positivo e negativo. Esse componente geralmente é composto por polímeros ou cerâmica.

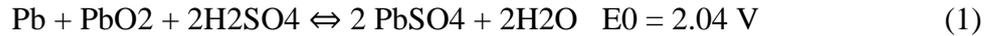
Cada tecnologia possui material diferente para cada parte de sua estrutura, o que altera custo, capacidade de armazenamento e de carga/descarga, etc.

3.1.1. PRINCIPAIS TECNOLOGIAS

Dentre as tecnologias presentes no mercado, algumas já estão sendo utilizadas há muito tempo e a não há expectativa de grandes avanços para os próximos anos em comparação ao estágio atual. Mas, também existem tecnologias com menos tempo de atuação e com alto potencial de desenvolvimento tecnológico. Nesta seção são mostradas as principais tecnologias de baterias presentes no mercado.

3.1.2. CHUMBO ÁCIDO

É um tipo de tecnologia já estável (Soloveichik, 2011), começou a ser desenvolvida em 1859 por Gaston Planté e é baseada em química simples, conforme Equação 1.

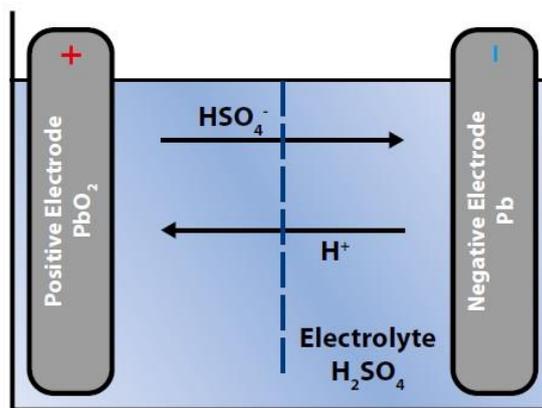


Essas baterias possuem os eletrodos isolados por separadores e imersos em um eletrólito de ácido sulfúrico, o anodo é composto por dióxido de chumbo e o catodo por chumbo. Com a finalidade de aumentar a vida útil da bateria, desenvolveram-se técnicas que combina o chumbo dos eletrodos com outros elementos, como por exemplo, o cálcio, antimônio e prata, formando ligas que melhoram as propriedades mecânicas e diminuem a perda de matéria ativa.

Este tipo de bateria é aplicado em diversos equipamentos devido, principalmente, à relação custo-benefício. Entretanto, há alguns pontos negativos consideráveis em comparação com outras tecnologias: baixa densidade de energia, peso elevado, não respondem bem a descargas profundas e, em razão da toxicidade, a aplicação desse tipo de bateria pode se tornar restrita. Existem duas categorias principais de bateria de chumbo ácido: ventiladas (úmidas) e reguladas por válvulas (VRLA, em inglês *Valve regulated lead-acid*) ou seladas (GEPEA/USP, 2017).

As baterias ventiladas possuem o eletrólito líquido e livre dentro da célula, conforme Figura 4, emitem quantidades consideráveis de gases durante o processo de carregamento e não podem ser instaladas no mesmo ambiente de equipamentos eletrônicos. Possuem baixa eficiência de saída/entrada (*round trip efficiency*), perde água continuamente (exige reposição de água), e a operação com baixo nível de eletrólito pode causar danos permanentes, como a sulfatação, que diminui drasticamente a vida útil da bateria.

Figura 4: Princípio de funcionamento da bateria de chumbo ácido



Fonte: (IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017)

A Tabela 1 apresenta resumidamente as vantagens e desvantagens da bateria de chumbo ácido ventilada.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens para baterias de chumbo ácido ventiladas.

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo quando comparada com as outras tecnologias de baterias secundárias	Baixo número de ciclos carga/descarga (aproximadamente 2.500)
Alta confiabilidade e baixas perdas no processo de conversão de energia (entre 70% e 90%)	Baixa densidade de energia (50 a 100 Wh/L)
Ampla experiência no processo de fabricação e na operação	Necessidade de reposição de água periodicamente
Pode ser implementado em aplicações de grande escala	Em caso de descarga profunda pode ocorrer a sulfatação
Boa faixa de temperatura operacional	Desempenho ruim quando operando além dos limites mínimo e máximo de temperatura ambiente
Baixo nível de complexidade de se obter os indicadores de estado da bateria	Capacidade assimétrica de carga e descarga
Diversos planos e tecnologias para reciclagem	

Fonte: (IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017)

As baterias reguladas por válvulas são um avanço tecnológico das baterias ventiladas. A válvula regula a pressão máxima, ventilando apenas nos momentos corretos. Por manter a pressão interna, a válvula de liberação de pressão também auxilia para a recombinação de oxigênio e hidrogênio em água. O eletrólito é imobilizado na forma de gel ou em separadores de fibra de vidro. A Tabela 2 apresenta as principais desvantagens e vantagens desse tipo de bateria quando comparadas às ventiladas.

Tabela 2: Vantagens e desvantagens para baterias de chumbo ácido reguladas por válvulas

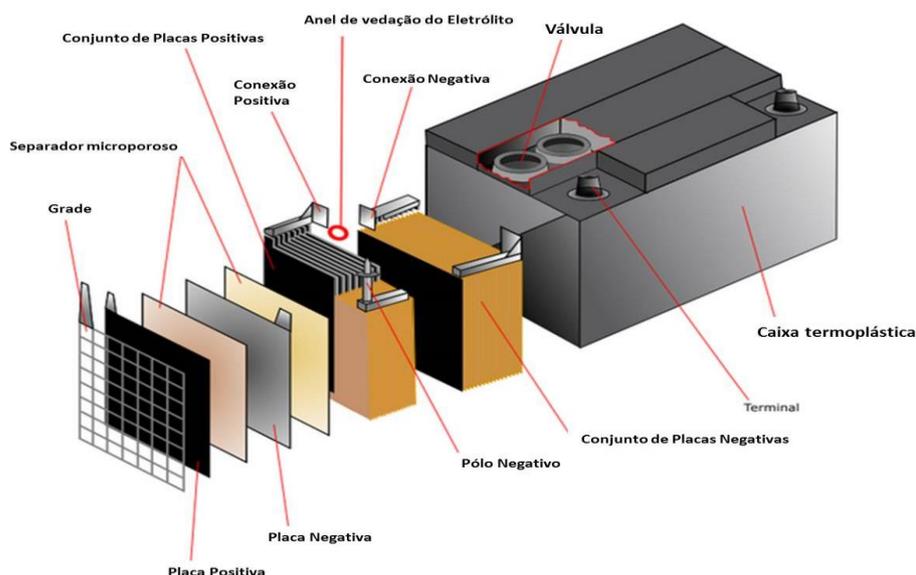
Vantagens	Desvantagens
O efeito de sulfatação é reduzido nas baterias reguladas por válvulas;	A temperatura tem maior influência sobre a vida útil deste tipo de bateria
Quando controladas as condições de temperatura ambiente, possuem maior vida útil;	Sensibilidade alta a sobrecargas, podendo ocorrer liberação de gases caso esse parâmetro não seja controlado;
Não há liberação de gases, o que permite aplicação em locais fechados;	Único modo de verificar o estado da carga é através do nível de tensão nos terminais da bateria;

O invólucro é completamente selado, o que evita o risco de derramamento de eletrólito;	
Manutenção simplificada, já que não é preciso repor eletrólito.	

Fonte: (IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017)

A Figura 5 mostra toda a estrutura de uma bateria de chumbo ácido regulada por válvula.

Figura 5: Estrutura de uma bateria de chumbo ácido regulada por válvula



Fonte: (IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017)

Existe também a tecnologia chumbo ácido avançado, que quando comparada com a tecnologia chumbo ácido convencional oferecem um desempenho melhor em aplicações de alta potência e maior quantidade de ciclos de carga/descarga. A diferença química é a adição de uma placa de carbono ao eletrodo negativo. Outro benefício é que a bateria de chumbo ácido avançado sofre menos efeito de sulfatação.

3.1.3. NÍQUEL CÁDMIO

Assim como o grupo de baterias de chumbo ácido, a tecnologia níquel cádmio (NiCd) é considerada madura, e possui semelhança física também. O eletrodo positivo é composto por

hidróxido de níquel, o negativo é feito de óxido de cádmio e o eletrólito é formado por hidróxido de potássio. Sua reação química é apresentada pela Equação 2.



A Tabela 3 apresenta algumas das principais vantagens e desvantagens relacionadas às células de níquel cádmio.

Tabela 3: Vantagens e desvantagens para as baterias de níquel cádmio

Vantagens	Desvantagens
Baixa Resistência Interna (menos da metade das células NiMH equivalentes)	Grande susceptibilidade ao efeito memória
Altas Taxas de carga/descarga	A impedância da célula aumenta rapidamente conforme uso incorreto da bateria, provocando aumento na taxa de auto descarga
Taxas de descargas de até 10C em curtos períodos	As células possuem baixa nível de tensão
Tolera altas taxas de profundidade de descarga	O Cádmio é um metal pesado de alto custo, seu uso é restrito em algumas aplicações devido a problemas ambientais
Ampla faixa de temperatura para operação (até 70° C)	
Ciclo de vida superior a 3000 ciclos	
Carga rápida, geralmente de 2 horas, podendo atingir tempos de 10 a 15 minutos	

Fonte: (IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017)

As células são seladas e utilizam um sistema semelhante ao das baterias de chumbo ácido reguladas por válvulas para evitar a perda de eletrólito e prolongar a vida útil da bateria. O tamanho reduzido proporcionou destaque da tecnologia em aplicações portáteis. Entretanto, com o desenvolvimento de novas tecnologias, como íon lítio e níquel hidretos metálicos, acabou perdendo espaço no mercado.

3.1.4. NÍQUEL HIDRETOS METÁLICOS (NIMH)

Surgiu na década de 1980, no Japão, e a comercialização iniciou-se na década seguinte. A diferença entre a tecnologia NiMH e NiCd é que ao invés de se utilizar o cádmio, utiliza-se

uma liga metálica para absorção de hidrogênio (hidreto metálico). A reação global é expressa na Equação 3.



O composto hidreto metálico no ânodo proporciona maior presença de níquel no eletrodo positivo da bateria, o que torna a bateria de NiMH com maior capacidade de fornecer energia nas mesmas condições que a bateria de NiCd. Além disso, a tecnologia NiMH é menos tóxica para o meio ambiente que a NiCd. A Tabela 4 apresenta as principais vantagens e desvantagens para as baterias NiMH.

Tabela 4: Vantagens e desvantagens das baterias de Níquel Hidretos Metálicos

Vantagens	Desvantagens
Flexibilidade no tamanho das células (0,3 Ah a 250 Ah)	Repetidos ciclos de causam o efeito de “vício”.
Operação em tensões elevadas (>320V)	Corrente limitada de descarga, melhores resultados obtidos com correntes entre 20% a 50% da corrente nominal
Excelente densidade energética (50% a mais que as de NiCad)	Alta taxa de autodescarga, cerca de 50% maior que as baterias de NiCd
Tolera altas taxas de profundidade de descarga	
Não requer cuidados de manutenção (livre manutenção)	
Excelente tolerância as variações de temperatura	
Circuitos de carregamento simples e baratos	
Materiais utilizados na manufatura ambientalmente aceitáveis e recicláveis	

Fonte: (IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017)

Atualmente essa tecnologia está sendo substituída pelas baterias de íon lítio. Entretanto, se mantém forte no mercado de baterias para aplicações em altas temperaturas, já que opera em temperaturas de -30 °C a +75 °C (Woodbank Communications Ltd, s.d.), o que excede a faixa de temperatura atualmente alcançada pelas células de lítio.

3.1.5. ÍON LÍTIO

É a principal tecnologia emergente no momento e recentemente ingressou no mercado de baterias de grande porte. São constituídas basicamente por um cátodo de lítio, um ânodo de carbono poroso e um eletrólito composto por sais de lítio num solvente orgânico. Conforme exposto pela reação global, Equação 4, as diversas tecnologias de baterias íon lítio envolvem ligas tanto no anodo quanto no catodo.



Este grupo de baterias apresenta bons níveis de densidade de energia e de potência, também possuem boa profundidade de descarga, eficiência na relação saída/entrada, longa vida útil e baixa taxa de auto descarga. Por esses motivos vem se tornando a tecnologia mais interessante para se explorar. A seguir são apresentados os principais tipos de bateria de íon lítio.

- Fosfato de Lítio e Ferro (*Lithium Iron Phosphate - LFP*)

As baterias de LFP possuem uma estrutura cristalina (olivine crystalline structure), que garante uma melhor estabilidade térmica quando comparada às outras estruturas de Íon Lítio, devido a isso, os sistemas de armazenamento utilizando esta tecnologia possuem monitoramento térmico mais simples e barato. Além disso, possui baixa resistência interna, grande quantidade de ciclos de carga/descarga e longa vida útil.

Segundo o relatório do IRENA (IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017), os esforços das atuais pesquisas buscam reduzir o tamanho das partículas dessa tecnologia para que melhore as condições de densidade energética. Também são vistas dopagens adicionais com metais, como por exemplo, vanádio ou titânio, que prometem incrementar a performance da célula de LFP. Apesar da atratividade, a maior desvantagem é o baixo nível de tensão da célula, o que obriga inúmeras células associadas para atingir a tensão solicitada pelo sistema de conversão de energia.

- Óxido de Lítio Níquel Manganês Cobalto (*Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide - NMC*)

A estrutura dessa tecnologia é feita por camadas de cristais, na proporção 1/1/1 de níquel, cobalto e manganês. Alguns fabricantes desenvolveram baterias com proporção de 5/3/2

e 4/4/1, a fim de diminuir os custos, já que o cobalto é um elemento caro. A NMC apresenta boa densidade energética, perfil térmico estável durante a operação, alta quantidade de ciclos de carga/descarga. É uma bateria com desempenho médio/alto nos quesitos analisados. É utilizada principalmente em veículos e ferramentas elétricas. A principal preocupação com esse tipo de bateria é com relação ao descarte, pois apresenta dois metais que são considerados tóxicos em certas concentrações: Manganês e Cobalto.

- Óxido de Lítio Manganês (*Lithium Manganese Oxide* – LMO)

A arquitetura química utilizada nas baterias LMO permite um melhor fluxo de íons no eletrodo, o que resulta em menor resistência interna e fluxo de corrente elétrica. A estrutura típica também permite boa estabilidade térmica e, assim, maior segurança na operação. O fato de possuir baixa resistência interna leva ao rápido carregamento e altas taxas de descarga. Esse tipo de bateria não é mais tão utilizado, pois, apresenta baixo número de ciclos de carga/descarga e acabaram perdendo espaço para as baterias NMC. As NMC podem ser consideradas uma evolução das LMO.

- Óxido de Lítio Níquel Cobalto Alumínio (*Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide* – NCA)

É uma tecnologia similar a NMC, oferece maior densidade de energia e de potência quando comparadas com as NMC, além de longa vida útil. Entretanto, não são tão seguras, pois apresentam maior instabilidade térmica e tem maior custo. São utilizadas principalmente em veículos elétricos e equipamentos médicos.

- Titanato de Lítio (*Lithium Titanate* – LTO)

Nas baterias LTO a principal diferença é a composição do anodo, que é composto por lítio e titânio. Nas outras tecnologias de Íon Lítio, este eletrodo é formado geralmente por carbono. Quanto ao catodo, pode ser composto de outras ligas como NCA, NMC ou LMO. É um tipo de bateria estável termicamente durante os processos de carga/descarga e tem um número de ciclos de carga/descarga muito maior que qualquer outra tecnologia de íon lítio, é justamente por isso que se tornou destaque nos sistemas estacionários. As desvantagens giram em torno da baixa densidade energética, nível de tensão na célula e do alto custo, pois é composta por titânio no seu eletrodo positivo.

A Tabela 5 apresenta um resumo das principais tecnologias de íon lítio disponíveis no mercado bem como as vantagens e desvantagens dessas variantes.

Tabela 5: Características das principais tecnologias de baterias do tipo Íon-Lítio

Principais elementos na composição	Óxido de Lítio Níquel Manganês Cobalto	Óxido de Lítio Manganês	Lítio Níquel Cobalto Alumínio	Fosfato de Lítio e Ferro	Titanato de Lítio
Abreviação do nome	NMC	LMO	NCA	LFP	LTO
Catodo	$LiNi_xMn_yCo_{1-x-y}O_2$	$LiMn_2O_4$ (spinel)	$LiNiCoAlO_2$	$LiFePO_4$	Variado
Anodo	C (Grafite)	C (Grafite)	C (Grafite)	C (Grafite)	$Li_4Ti_5O_{12}$
Segurança					
Densidade de Potência					
Densidade de Energia					
Custo da Célula					
Vida Útil					
Performance do BES					
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Pode atuar em aplicações de alta potência e alta energia - Perfil térmico estável - Pode operar em alta tensão - Possui várias combinações entre seus elementos 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo devido a abundância de manganês - Perfil térmico muito estável - Boa para aplicações de alta potência 	<ul style="list-style-type: none"> - Muito boa para aplicações de alta energia e boa para aplicações de alta potência - Extensa vida útil - Boa eficiência 	<ul style="list-style-type: none"> - Perfil térmico muito estável - Boa quantidade de ciclos de cargas/descarga - Muito boa para aplicações de potência - Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> - Estabilidade térmica muito boa - Extensa vida útil - Alta capacidade de descarga
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Problemas com patente em alguns países 	<ul style="list-style-type: none"> - Número de ciclos de carga/descarga insuficiente para algumas aplicações - Baixa performance para aplicações de alta energia 	<ul style="list-style-type: none"> - No processo de carregamento a segurança pode ser comprometida devido ao aumento de temperatura - A capacidade de armazenamento pode ser afetada se a temperatura não estiver na faixa de 40-70 graus 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa densidade de energia devido ao baixo nível de tensão da célula 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto custo do titânio - Nível de tensão baixo na célula - Baixa densidade de energia

Fonte: (IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017)

Os pontos negativos em destaque são o alto custo e os cuidados com a temperatura, que pode causar a explosão da bateria. Entretanto as baterias de íon lítio apresentam maior perspectiva de desenvolvimento, pois os custos de fabricação estão caindo e as tecnologias de sistemas de monitoramento também estão evoluindo para cada tipo de bateria íon lítio disponível no mercado, o que direciona as tecnologias para aplicações específicas, com a finalidade de se obter menor custo.

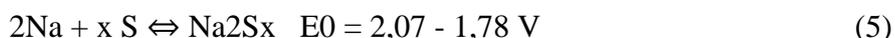
3.1.6. LÍCIO POLÍMERO

Apresenta características de desempenho muito semelhante às baterias de íon lítio, o que diferencia as duas tecnologias é o fato de utilizar um eletrólito sólido, mais seguro e resistente a vazamentos. Como não há líquido, a célula de lítio polímero não requer os pesados invólucros de proteção das tecnologias tradicionais de lítio. Este tipo de eletrólito reduz os perigos relacionados à inflamação, que é um dos principais pontos negativo das células de íon lítio. Entretanto, nas atuais condições, essas células apresentam menor densidade energética e menor ciclo de vida quando comparadas às baterias de íon lítio.

3.1.7. SÓDIO ENXOFRE

O desenvolvimento das baterias de sódio enxofre (NaS) está acontecendo principalmente em aplicações que envolvem armazenamento em larga escala. Isso ocorre devido a características como alta densidade de energia, eficiência na carga/descarga, um longo ciclo de vida e matéria prima de baixíssimo custo. Tais fatores a tornam uma das tecnologias mais promissoras para o futuro.

Basicamente a composição química da bateria se dá por um anodo de sódio fundido, um catodo de enxofre derretido e um separador de cerâmica condutora de íons de sódio. A reação global é apresentada na Equação 5, com Na_2S_x ($x = 3-5$).



A Tabela 6 mostra algumas vantagens e desvantagens da tecnologia. Destaca-se a dificuldade na operação, devido a necessidade de altas temperaturas, e o baixo custo global da bateria.

Tabela 6: Vantagens e desvantagens das baterias de sódio enxofre

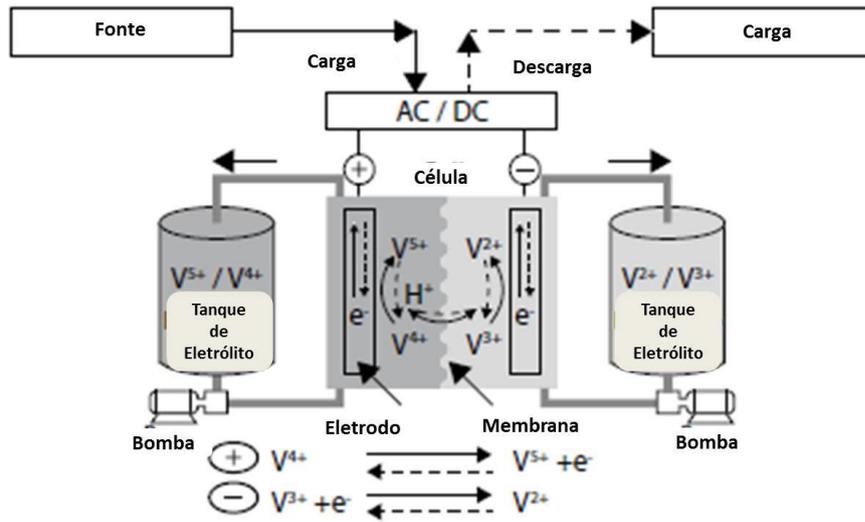
Vantagens	Desvantagens
Baixo custo em relação aos outros tipos de baterias secundárias – Matérias primas baratas.	Manuseio e segurança problemáticos.
Alta densidade de energia.	A reação química com os materiais ativos deve ser controlada.
Operação flexível - Funcionam sobre uma ampla gama de condições de temperatura e profundidade de descarga.	Alta temperatura de operação – Precisam de um gerenciamento térmico.
Insensibilidade às condições ambientais.	Requer hermeticidade da célula em ambientes corrosivos.
Ciclos de vida extensos.	
Facilidade para estimar o estado de carga (SoC).	

Fonte: (IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017)

3.1.8. FLUXO REGENERATIVO

As baterias de fluxo consistem em dois eletrólitos líquidos de soluções salinas armazenados em tanques diferentes. Ambos são bombeados para uma câmara de reação, onde há uma membrana que permite o fluxo dos elétrons, a Figura 6 apresenta o esquema físico de uma bateria de fluxo regenerativo.

Figura 6: Mecanismo de operação de uma bateria de fluxo de vanádio.



Fonte: (IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017)

Sua capacidade de armazenamento de energia depende do volume do tanque do eletrólito e do fluxo com que o eletrólito é bombeado: essa é a principal diferença entre as baterias de fluxo das demais. Já a quantidade de energia elétrica que a bateria pode fornecer depende da área da membrana que separa os dois eletrólitos. Quanto maior for essa membrana maior é a troca iônica, e assim, maior a quantidade de energia que pode ser convertida instantaneamente.

Dentre os diversos tipos de bateria de fluxo que estão em desenvolvimento, há duas que são mais comuns: redox de vanádio e bromo zinco. A Tabela 7 mostra as vantagens e desvantagens ao utilizar essas tecnologias

Tabela 7: Vantagens e desvantagens para baterias de fluxo de zinco bromo e redox de vanádio

	Vantagens	Desvantagens
Zinco Bromo	Grandes quantidades de energia podem ser armazenadas por longos períodos de tempo, devido à baixíssima taxa de auto descarga da bateria.	São relativamente mais complexas em relação às baterias convencionais.

	Elevada energia específica de 75 a 85 Wh/kg, isto é, entre duas a três vezes maiores do que as baterias de chumbo-ácido	Necessitam de bombas, sensores, unidades de controle, etc., para seu adequado funcionamento.
	Eficiência energética de 75% a 85%.	Apresentam baixa densidade de energia se comparadas as baterias de íon-lítio.
	Ciclos de vida superiores aos 10.000 ciclos de carga e descarga em 100% de profundidade de descarga sem qualquer dano.	Apresentam elevados custos de manutenção.
	São basicamente construídas de plástico reciclado, permitindo a produção de baixo custo e elevada capacidade de reciclagem.	
	Apresentam um rápido tempo de resposta e não emitem poluentes perigosos.	
	Tolerância às sobrecargas.	
Redox de Vanádio	Apresentam um rápido tempo de resposta, na faixa dos 350 μs	A principal desvantagem é a fraca relação energia – volume, tornando difícil o manuseio, especialmente em instalações de grande porte
		Elevado custo de manutenção.
	Tempo de vida longo quer, em carga profunda ou descarga	São relativamente mais complexas em relação as baterias convencionais.
	Tolerância às sobrecargas.	
	Facilidade de aumento da capacidade de armazenamento.	
	Operação à temperatura ambiente com pouca sensibilidade às variações de temperatura.	
	Desempenho do sistema superior aos 75%	
	Baixíssima taxa de autodescarga.	
	Suportam repetidas cargas e descargas profundas sem degradar o rendimento do sistema (podem ser carregadas e descarregadas mais de 10.000 vezes sem degradar o rendimento).	
	Se acidentalmente algum eletrólito se misturar na bateria, não sofre danos permanentes.	
	Reduzido impacto ambiental (emite apenas de 7% a 25% da quantidade de emissões poluentes de uma bateria de chumbo-ácido, durante o ciclo de vida).	

Fonte: (GEPEA/USP, 2017)

Ainda existem mais tecnologias desse tipo tais como: Redox Híbrida de ferro, Polissulfeto, ferro-cromo, ferro-titânio, ferro-estanho, brometo-hidrogênio, no entanto ainda não são difundidas e estão em fase de desenvolvimento.

3.1.9. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA BATERIAS

A indústria de baterias oferece diversas opções de tamanhos, formatos, tensão e tecnologias químicas. Por esse motivo, é necessário que se especifique com exatidão algumas características para atender corretamente a aplicação desejada, verificando a melhor opção disponível para o melhor custo-benefício e segurança. Nessa seção são apresentadas as principais características que devem ser analisadas para a escolha da bateria.

3.1.9.1. ESPECIFICAÇÕES ELÉTRICAS

Parâmetros como tensão e corrente são elementares para a definição de qualquer escopo de projeto elétrico. Tratando-se de sistemas utilizando baterias é importante verificar a faixa de atuação e o comportamento dessas grandezas ao longo do tempo, por exemplo, nos processos de carga e descarga. São os principais parâmetros para se observar durante o monitoramento do estado da carga da bateria (Woodbank Communications Ltd, s.d.).

TENSÃO

A tensão da bateria está relacionada ao número de células conectadas em série, e a diferença de potencial nos terminais da bateria é a soma da tensão de todas as células. A tensão nominal é a base para o dimensionamento do sistema, pois é a referência da bateria, no entanto, deve ser considerada toda a faixa operacional de tensão para a aplicação escolhida, evitando contratempos em momentos que a carga está completa e a tensão na bateria atinge seus maiores níveis e quando a carga está baixa, com menores níveis de tensão. É importante observar também a tensão no momento em que a bateria necessita ser recarregada, a tensão de corte, para especificação correta do carregador e do método de carregamento, a fim de aumentar a vida útil da bateria.

CORRENTE

A corrente está relacionada com o número de células conectadas em paralelo, onde o fluxo total de elétrons é a soma das correntes de todas as células. Em determinadas aplicações são feitas descargas de alta potência, se a bateria suportar fornece corrente conforme a demanda, podendo superar seu valor nominal. Geralmente o fabricante especifica os valores de corrente

média, pico e o mínimo, caracterizando a faixa de operação da bateria. O comportamento da corrente de descarga usualmente é definido em Amperes hora (Ah) ou através da taxa C (*C Rate*), parâmetros que definem a capacidade nominal de fornecimento constante de corrente.

CAPACIDADE DE FORNECIMENTO DE CORRENTE (AMPERE-HORA PARA UMA TAXA C – “C RATE”)

Representa a corrente ou a quantidade de carga transportada pela bateria no período de uma hora. Portanto a taxa padrão de 1 C é igual ao valor em Ampere-Hora nominal da bateria em questão. Por exemplo, caso a especificação de corrente da bateria seja de de 1Ah, a taxa C (*C Rate*) nominal é 1Ah, ou seja, 1Ah é equivalente a 1 C. Significa que o sistema descarrega 1 A em uma hora ou a mesma quantidade de carga em tempos menores, como 2A em 30 minutos (2 Ah em 0,5 hora), em que aumenta a demanda de corrente e diminui o tempo nos processos de carga e descarga. A Tabela 8 exemplifica o uso da taxa C para uma bateria de 20 Ah.

Tabela 8: Exemplo de uso da taxa C

Taxa C	Corrente de descarga (A)	Tempo de descarga (Horas)
1 C	20	1
2 C	40	0,5
5 C	100	0,1
0,5 C	10	2
0,1 C	2	10

Fonte: (Woodbank Communications Ltd, s.d.)

Observa-se que, quanto maior a taxa C, maior a corrente de descarga e menor o tempo de descarga/carga.

ENERGIA NOMINAL (WH)

É o montante de energia que a bateria é capaz de armazenar, em condições normais de operação estabelecidas pelo fabricante, medida em Watt-hora.

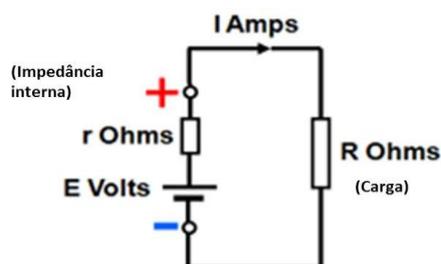
POTÊNCIA NOMINAL (W)

É limite de potência dissipada pela bateria nas operações de carga e descarga, em condições normais, sem danificar a bateria.

IMPEDÂNCIA INTERNA

As baterias apresentam uma pequena impedância interna, que ocorre devido as características físicas do eletrólito: quanto menor o tamanho granular do material eletrolítico, menor a impedância. A impedância interna de uma célula determina sua capacidade de transporte de energia, um valor baixo desse parâmetro permite correntes maiores para a célula. A Figura 7 apresenta o circuito equivalente de uma bateria.

Figura 7: Circuito Equivalente de uma Bateria

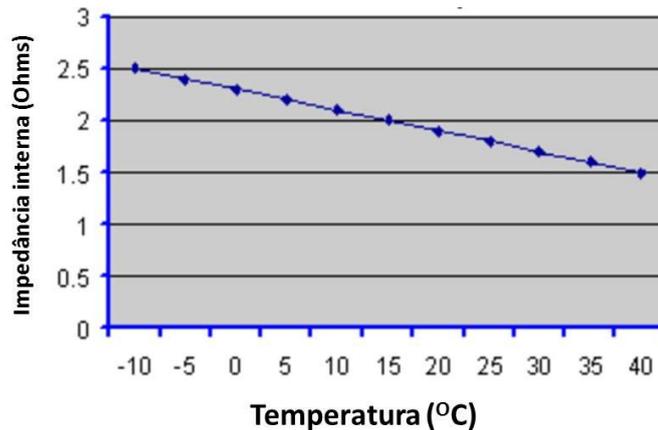


Fonte: (Woodbank Communications Ltd, s.d.)

Quando se conecta uma carga aos terminais da bateria há uma queda de tensão na impedância interna (r), o que diminui a tensão nos terminais da bateria durante a descarga e aumenta a tensão necessária para o processo de carga, implicando em redução da eficiência desses processos. Em baterias de menor porte o efeito da impedância interna é quase imperceptível, porém em sistemas de grande porte ocorrem perdas consideráveis, pois taxas de descargas mais altas dão origem a quedas de tensão internas mais altas, isso explica as diferentes curvas de carga/descarga para diferentes taxas C.

A temperatura também afeta esse fator: quanto maior a temperatura menor é a impedância interna, conforme a Figura 8 que mostra a relação de impedância interna por temperatura para uma bateria de chumbo ácido.

Figura 8: Variação da impedância interna com a temperatura



Fonte: (Woodbank Communications Ltd, s.d.)

Alguns cuidados são necessários para não ultrapassar a temperatura que prejudique o funcionamento e a segurança na operação da bateria. Outro fator negativo atribuído a técnicas que diminuam a impedância interna é o alto índice de autodescarga.

Também é importante atentar às perdas naturais causadas pelo processo de envelhecimento das células. Na medida que a célula envelhece, a resistência do eletrólito tende a aumentar, as superfícies dos eletrodos se deterioram e as áreas efetivas diminuem. Esses efeitos aumentam a impedância interna, afetando a capacidade de armazenar energia e a eficiência da bateria. Com isso, a comparação de impedância interna de uma célula com o valor referência pode ser utilizado como fator de monitoramento do estado de saúde da célula.

PARÂMETROS ADICIONAIS

Para que se tenha uma operação segura e correta da bateria, visando prolongar a vida útil e obter maior aproveitamento da energia estocada é recomendado respeitar aspectos além dos parâmetros elétricos, são eles: profundidade de descarga, condições ambientais, estado de saúde, taxa de carga, etc.

PROFUNDIDADE DE DESCARGA

A profundidade de descarga (DoD, em inglês *Depth of Discharge*) representa a porcentagem que a bateria é descarregada, tendo como referência a capacidade nominal de armazenamento da bateria. Por exemplo, uma profundidade de descarga de 100% descreve que a bateria foi completamente descarregada; já uma profundidade de descarga de 80% retrata um descarregamento de 80% da bateria.

Limitar a profundidade de descarga pode trazer benefícios para a bateria, pois evita o baixo nível de tensão de uma descarga de 100% da bateria e preserva os produtos químicos presentes nos eletrodos. O fabricante fornece o número de ciclos de carga-descarga de uma bateria em relação à profundidade de descarga. Citando o caso das baterias de chumbo-ácido (Rontek, s.d.), com uma profundidade de descarga de 100% apresenta de 150 a 200 ciclos, já com 50% de profundidade de descarga apresenta de 400 a 500 ciclos e com 30% o número de ciclos é de 1000 ou mais.

CONDIÇÕES AMBIENTAIS

O local escolhido para instalação do sistema de armazenamento deve oferecer o mínimo de condições para não prejudicar o funcionamento da bateria, caso contrário, devem-se adaptar estruturas para não causar danos ao sistema de armazenamento. A temperatura ambiente deve ser monitorada constantemente, uma vez que as baterias operam em uma faixa limitada de temperatura e o funcionamento fora desses limites resulta em degradação no desempenho ou falha completa, com riscos, inclusive de explosão. Portanto, ao operar, se a temperatura ambiente for muito baixa, pode diminuir o fluxo de energia e prejudicar o funcionamento, sendo necessário um sistema de aquecimento para manter a bateria em condições adequadas de transferência de energia. Se a temperatura ambiente for muito alta, faz-se necessário um sistema de refrigeração para manter a bateria nas condições normais de atuação.

TEMPO DE REAÇÃO

Dependendo da aplicação, a bateria pode ser obrigada a reagir a uma queda de energia em milissegundos para evitar perda de dados, interrupção de processos ou outras falhas do sistema. Para isso, é necessária atuação em conjunto com um inversor de resposta rápida, a bateria então deve ser especificada com um inversor correspondente para sua aplicação.

DIMENSÃO E PESO

As diversas tecnologias existentes variam seu peso por quantidade de energia (Wh/kg) e por volume que ocupam (Wh/L). Portanto, existem tecnologias que concentram energia em um volume e peso menor, e a melhor escolha ocorre em razão do espaço disponível e da estrutura de sustentação do local.

3.1.9.2. PARÂMETROS PARA MONITORAR O ESTADO DA BATERIA

O sistema de gerenciamento da bateria tem diversas funções, como monitorar as condições de funcionamento para garantir o melhor aproveitamento do recurso armazenado e assegurar a operação do sistema dentro dos limites de segurança estabelecidos pelo fabricante. Os principais parâmetros de monitoramento são: estado da carga, ciclo de vida, e estado de saúde. Outros fatores para verificar o estado da bateria já foram citados em tópicos passados, como a tensão de corte e corrente de carga e descarga.

ESTADO DA CARGA (*STATE OF CHARGE* – SOC)

O estado da carga (SoC, em inglês *State of Charge*) é definido como a capacidade de energia disponível expressa como a porcentagem de algum valor de referência. Geralmente o valor escolhido como referência é a quantidade de energia da última carga, o que pode causar a falsa impressão de que a bateria esteja totalmente carregada em certas condições, pois, conforme a utilização da célula de armazenamento, sua capacidade de estocar cargas torna-se menor. Por exemplo, ao final da vida útil da bateria, a célula armazena apenas 80% da carga nominal, se a referência é a quantidade de energia armazenada nesse último ciclo de carga o estado da carga será 100%, porém a bateria tem apenas 80% da carga nominal. A referência adequada para o parâmetro de estado da carga, portanto, é o valor nominal de carga da bateria, e não aquele apresentado no último ciclo de recarga.

ESTADO DE SAÚDE (*STATE OF HEALTH* – SOH)

Durante o tempo de vida de uma bateria, o seu desempenho tende a deteriorar-se gradualmente devido às mudanças físicas e químicas irreversíveis que ocorrem com o uso e a idade. Este parâmetro é uma medida que reflete a condição geral da bateria e sua capacidade de desempenho comparada com uma bateria nova. O SOH considera fatores como aceitação de carga, resistência interna e autodescarga, e é um indicativo de quanto da vida útil da bateria foi consumida.

ESTADO DA FUNÇÃO

Devido às inúmeras funções que um sistema de armazenamento pode realizar, o sistema de gerenciamento deve monitorar qual serviço está em operação e o tempo de atuação em cada função. É importante ressaltar que um sistema de armazenamento de energia elétrica pode realizar mais de uma função ao mesmo tempo.

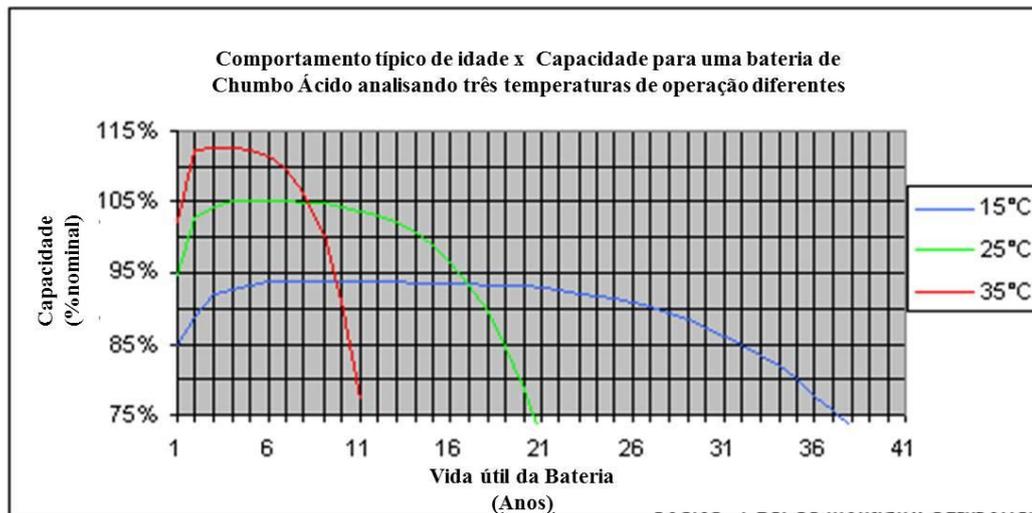
CICLO DE VIDA

Esse parâmetro fornece uma indicação da vida útil esperada da célula e varia conforme cada tipo de química da célula, aplicação e forma de operação, e é definido como o número de ciclos que uma célula pode executar antes de deixar de cumprir os critérios de desempenho específicos. A cada ciclo de carga-descarga ocorrem transformações químicas que não são totalmente reversíveis, o que causa lenta deterioração das substâncias presentes na célula. O ciclo de vida é afetado por outros fatores como temperatura, profundidade de descarga, carregamento incorreto e sobrecarga.

EFEITOS DA TEMPERATURA

As reações químicas internas da bateria ocorrem com a aplicação de uma tensão aos seus eletrodos ou devido a temperatura: quanto maior a temperatura da bateria, mais rápidas são as reações químicas, o que proporciona um melhor desempenho na troca de elétrons. Entretanto o acréscimo na taxa de reações indesejadas acarreta em efeitos como a passivação dos eletrodos, corrosão, gaseificação e aumento na taxa de autodescarga, comprometendo a vida útil da bateria. A Figura 9 apresenta o comportamento da capacidade de armazenamento da bateria durante sua vida útil, em 3 temperaturas diferentes.

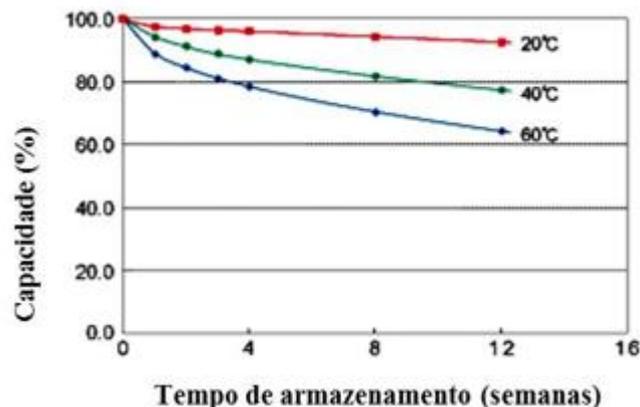
Figura 9: Influência da temperatura na capacidade de armazenamento e vida útil da bateria de chumbo ácido.



Fonte: (Woodbank Communications Ltd, s.d.)

Na Figura 10 verifica-se como a temperatura influencia na taxa de autodescarga para uma bateria de íon lítio.

Figura 10: Influência da temperatura na taxa de auto descarga de uma bateria de íon lítio



Fonte: (Woodbank Communications Ltd, s.d.)

Em baixas temperaturas, a velocidade das reações químicas diminui, reduzindo a taxa de transferência de energia. Nos níveis abaixo das temperaturas limites ocorre até o congelamento do eletrólito, o que causa parada total do funcionamento da bateria.

Além dos efeitos causados no funcionamento da bateria, é necessária maior atenção na operação desses equipamentos dentro dos limites estabelecidos devido ao risco de explosão, emissão de gases tóxicos, e vazamento de dejetos químicos que atingem diretamente o meio ambiente. Portanto, sistemas de armazenamento precisam de elementos para realizar o controle da climatização da bateria e manter a operação dentro dos limites de temperatura determinadas pelo fabricante.

3.1.9.3. PROCESSOS DE OPERAÇÃO

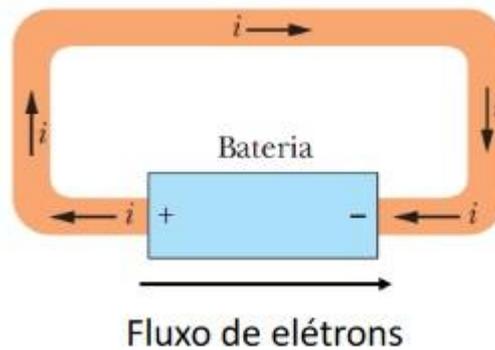
A reação química que ocorre entre eletrólito e eletrodo negativo produz um acúmulo de elétrons livres (carga negativa). Já a reação entre eletrólito e eletrodo positivo produz um excesso de íons positivos (átomos que estão faltando elétrons, tem carga positiva). Os processos de operação de uma bateria são:

PROCESSO DE DESCARGA

O fenômeno ocorre quando a bateria está carregada, ou seja, o ânodo está com excesso de cargas negativas e o cátodo apresenta grande número de lacunas (falta de elétrons), causando uma diferença de potencial entre os eletrodos. Ao introduzir a bateria em um circuito, surge um campo elétrico que faz com que os elétrons fluam ordenadamente no sentido do ânodo (polo negativo da bateria) para o cátodo (polo positivo da bateria): é o denominado fluxo real dos elétrons. A corrente elétrica segue o sentido convencional, que é contrário ao sentido real

(Halliday, Resnick, & Jearl, 2012). A Figura 11 mostra o fenômeno que ocorre ao se introduzir a bateria em um circuito.

Figura 11: Fluxo de elétrons em uma bateria



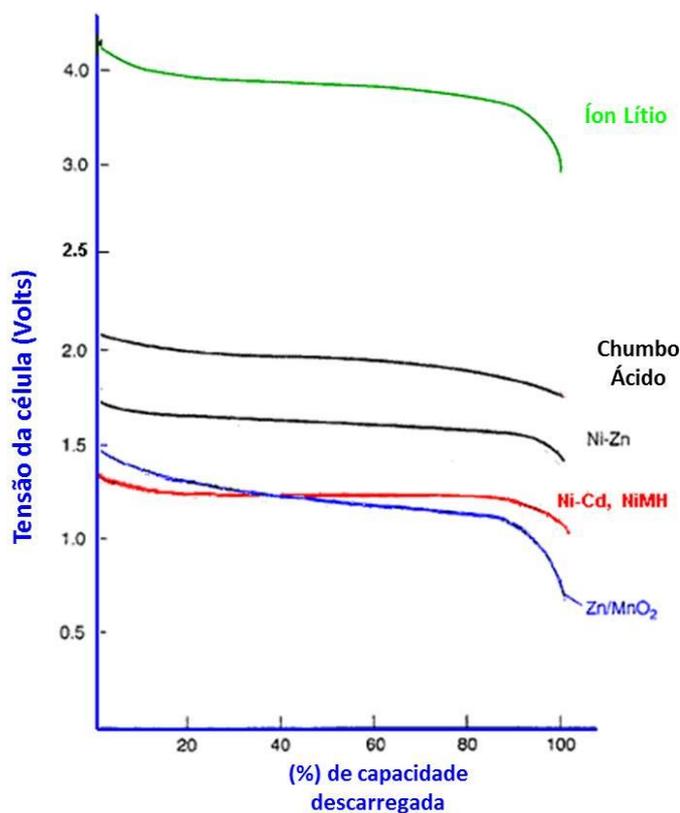
Fonte: (Halliday, Resnick, & Jearl, 2012)

Ao longo do tempo a bateria entra em equilíbrio, os elétrons saem todos do anodo e se alojam no cátodo, levando a diferença de potencial entre os eletrodos a zero. O circuito é balanceado através do fluxo dos íons no eletrólito e a corrente elétrica torna-se inexistente. Esse é o processo de descarga, em uma célula primária essa ação é irreversível e a bateria não pode ser recarregada.

CURVAS DE DESCARGA

Existem diversas tecnologias de bateria presentes no mercado para atender a ampla gama de aplicações, assim, têm-se inúmeras características de desempenho disponíveis. A tensão nominal de uma célula, por exemplo, é dada por sua composição química. A Figura 12 mostra as curvas típicas de descarga para algumas tecnologias químicas quando descarregadas a uma taxa de 0.2C. Nota-se que cada composição química apresenta uma curva nominal de tensão conforme a porcentagem da capacidade descarregada. A célula de Íon Lítio, que tem a maior tensão na célula totalmente carregada, apresenta uma curva de descarga bastante plana, saindo de 4,2 V caindo para 3,7 V até aproximadamente 10% de descarga, e se mantendo nesse nível de tensão até a faixa de 85 a 90%, enquanto as demais, como a célula de chumbo ácido apresentam uma queda constante durante todo o ciclo de descarga (Woodbank Communications Ltd, s.d.).

Figura 12: Curva de descarga para algumas tecnologias de bateria



Fonte: (Woodbank Communications Ltd, s.d.)

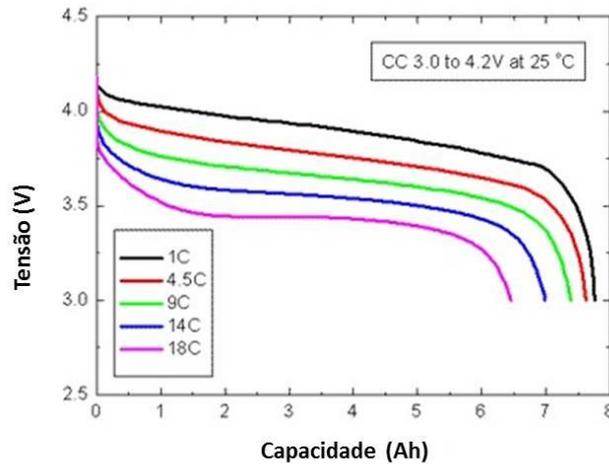
Para certas aplicações, há a necessidade de a bateria injetar alta potência na rede, e, caso a bateria apresente uma curva com queda constante durante a descarga, pode causar problemas para esse tipo de aplicação devido à queda na tensão no final do ciclo. Por esse motivo, é necessário que a descarga ocorra com capacidades menores ou o acoplamento de um regulador de tensão. Esse problema não ocorre ao se utilizar uma tecnologia com uma curva plana, pois a tensão de alimentação permanece razoavelmente constante durante todo o ciclo de descarga. Portanto, observar a curva de descarga de uma bateria torna-se um fator importante na escolha da tecnologia para a aplicação adequada, ou então buscar alternativas que compensem as deficiências decorrentes de certas tecnologias.

TAXAS DE DESCARGA

Um sistema de armazenamento pode ser utilizado em diversas taxas de descarga. Isso depende de como a carga se comporta: se a carga exigir um montante de energia alto a bateria irá descarregar em taxas de energia mais altas, caso contrário a taxa será menor. Ao se projetar um sistema para suprir uma carga é necessário verificar o perfil de consumo, assim a bateria terá sua operação em taxas de descarga que preservem todo o sistema.

A Figura 13 apresenta o efeito de cinco taxas de descarga diferentes para uma célula de íon lítio. Observa-se que, quanto maior for a taxa de descarga, menor é o tempo de atuação da bateria, esgotando-se mais rápido e chegando a menor capacidade de energia armazenada.

Figura 13: Diferentes taxas de descarga para bateria de íon lítio.



Fonte: (Woodbank Communications Ltd, s.d.)

AUTODESCARGA

Mesmo quando não estão operando em um circuito, as baterias possuem uma taxa mínima de descarga que ocorre naturalmente devido à reações químicas indesejadas. Essa taxa varia de acordo com a tecnologia química da bateria e também sofre influência da temperatura. Para as baterias secundárias, a autodescarga afeta o tempo entre as recargas, podendo tornar o número de ciclos de carga/descarga maior em período menor ao planejado.

PROCESSO DE CARGA

Nas células chamadas secundárias, a reação química verificada no processo de descarga é reversível, tornando possível a reconstituição completa dos compostos químicos originais através da aplicação de uma tensão elétrica entre os eletrodos que injetam energia nas células, e, assim, as baterias podem ser descarregadas e carregadas inúmeras vezes.

Durante a carga da bateria é importante observar três pontos chaves:

- **Fim de um ciclo de recarga:** uma vez que a bateria esteja totalmente carregada, o carregador deve identificar tal estado e cortar o processo de carga. Caso isso não ocorra, a bateria pode ultrapassar o limite de temperatura e emitir gases tóxicos, além de diminuir a vida útil da

bateria. Também há risco de explosão da bateria, devido aos elementos altamente inflamáveis e excesso de calor presentes.

- **Controle de temperatura:** deve-se atentar com a temperatura da célula durante o carregamento. O calor causa danos irreparáveis para a bateria, e o monitoramento da temperatura evita diversos riscos e mantém a célula eletroquímica em operação normal.
- **Taxa de energia durante o carregamento:** durante o processo de carregamento rápido, é possível “bombear” energia elétrica para a bateria mais rápido do que o processo químico pode reagir a essa energia. Para que isso ocorra, é necessário que a taxa de injeção de energia seja menor ou igual ao tempo que a reação química interna da célula leva para acontecer, e é necessário que o carregador faça a dosagem certa de injeção de carga para não prejudicar a bateria.

Mesmo regulando corretamente os três pontos chaves citados acima, ainda podem ocorrer alguns efeitos parasitas como a passivação do eletrodo (diminuição do potencial), formação de cristais e acúmulo de gás, que afetam o tempo de carregamento e a eficiência. Esses efeitos podem acontecer ao final da vida útil da bateria ou caso sejam desrespeitados os três parâmetros fundamentais para carregar a bateria.

MÉTODOS BÁSICOS DE CARREGAMENTO

O principal objetivo do controle do carregamento é obter bons níveis para o estado de carga. Entretanto, outros parâmetros como a desempenho da bateria, tempo de carregamento, proteção do sistema de armazenamento e vida útil também podem ser influenciados no processo de carga da bateria. Segundo (Banguero, Correcher, Pérez-Navarro, Morant, & Aristizabal, 2018) existem diferentes métodos para controlar efetivamente o carregamento da bateria. Os processos comumente usados no carregamento da bateria são descritos nos próximos tópicos.

CORRENTE CONSTANTE

Esse método consiste no carregamento da bateria com uma corrente constante. Quando ocorre a variação da tensão para manter a corrente constante - dado que a tensão não é constante -, pode acontecer sobretensão e conseqüente aumento de temperatura, o que prejudica a vida útil da bateria. Quando a tensão atinge o nível de carga total, o carregador é desligado.

TENSÃO CONSTANTE

Consiste no carregamento da bateria com uma tensão constante, ou seja, realizado por uma fonte de corrente contínua convencional. Apresenta uma corrente transitória alta, que se estabiliza quando a tensão atinge seu limite ajustado. O carregamento é desativado quando o fluxo de cargas cessa.

TENSÃO E CORRENTE CONSTANTES

Esse método também é conhecido como método de duas etapas, pois combina o método de tensão constante com o método de corrente constante. Primeiramente, o carregador atua no modo corrente constante para limitar a corrente transitória até que a tensão atinja o nível nominal para efetuar o carregamento e, em seguida, o carregador converte sua atuação para o método de tensão constante, evitando assim sobretensão na bateria. Em geral é o método mais utilizado, pois apresenta flexibilidade quanto à tecnologia da bateria, entretanto não é adequado para carregamento rápido, pois o método de tensão constante eleva o tempo de carregamento, causando aumento da temperatura e diminuição da vida útil da bateria.

CARREGAMENTO POR PULSO

Consiste em aplicar periodicamente uma corrente pulsada à bateria. A taxa de carregamento pode ser controlada com precisão, variando a largura dos pulsos, normalmente com intervalos de próximos de um segundo. Entre os pulsos há um curto período de descanso de 20 a 30 milissegundos: isso permite que as reações químicas se estabilizem, equalizando a reação em toda a massa do eletrodo antes de recomeçar a carga. Em (Woodbank Communications Ltd, s.d.) afirma-se que este método pode reduzir reações químicas indesejáveis na superfície do eletrodo que causam formação de gás, crescimento de cristais e passivação.

CARREGAMENTO POR PULSO NEGATIVO

É uma sequência de pulso de carga, intervalo de descanso, breve pulso de descarga e intervalo de descanso, antes do novo pulso de carga. A função desse breve pulso de descarga é despolarizar a célula, desalojando qualquer bolha de gás que se acumule nos eletrodos durante o carregamento rápido, acelerando assim o processo de estabilização química. Como há descarregamento momentâneo da bateria, esse método pode reduzir a eficiência do carregamento.

CARREGAMENTO EM GOTEJAMENTO

Esse método consiste em um carregamento constante de baixa intensidade de corrente. Foi criado principalmente para compensar a autodescarga da bateria. O tempo de recarga é longo, por isso não é recomendado para certas aplicações, a não ser que o carregador seja multi-função e alterne para esse método de carregamento lento quando a bateria estiver completamente carregada. Por manter a injeção de corrente constante, esse método pode ser prejudicial, pois mantém certa dissipação de calor constante na célula.

CARGA FLUTUANTE

A bateria e a carga são conectadas em paralelo através do carregador e mantidas em uma tensão constante abaixo do limite de tensão superior da bateria. Esse método é utilizado para manter a carga total da bateria para atuação em situações de emergência e *Peak Shaving*, por exemplo.

3.1.10. APLICAÇÕES DOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO ELETROQUÍMICOS

O diagrama da Figura 14 resume as áreas onde o armazenamento de energia foi implementado com sucesso visando melhorias no desempenho técnico e econômico, além de buscar flexibilidade e resiliência para o sistema elétrico.

Figura 14: Resumo das Áreas de Atuação dos Sistemas de Armazenamento.



Fonte: (Woodbank Communications Ltd, s.d.).

REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA

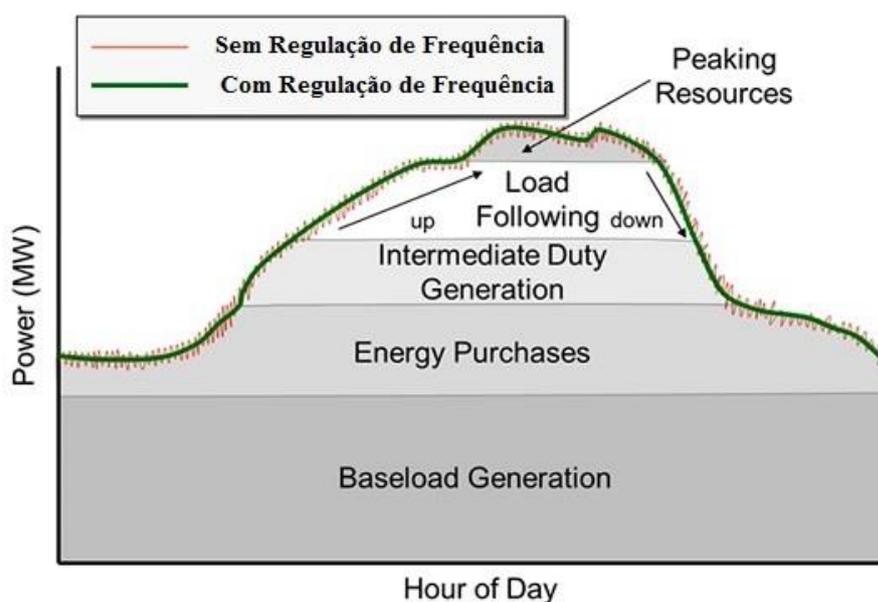
A rede elétrica transmite energia dos geradores até os consumidores finais em corrente alternada com frequência fixa, geralmente em 60Hz. Quando a geração é igual ao uso de energia elétrica, a frequência se mantém estável. Se o consumo for maior que o suprimento energético a frequência decai, podendo causar queda na tensão e *blackout*.

A regulação de frequência está diretamente relacionada ao equilíbrio entre oferta e demanda, atuando segundo a segundo para manter os parâmetros de qualidade de energia dentro dos limites tolerados. Com a disseminação das fontes renováveis intermitentes, a variabilidade na oferta e as flutuações na frequência ocorrem cada vez mais.

Normalmente as unidades geradoras aumentam ou diminuem a geração para compensar os desvios de frequência. Segundo o Fórum Mundial de Armazenamento de energia (ESWF, 2014), a regulação de frequência é o serviço auxiliar de maior valor para a rede e o armazenamento de energia elétrica está sendo usado cada vez mais ao invés de usinas de combustíveis fósseis para esta aplicação, já que sua flexibilidade e tempo de resposta são melhores, tornando-os bem adequados para este fim.

A Figura 15 mostra a diferença na variação da frequência entre um sistema com armazenamento de energia e outro sem armazenamento para esta aplicação. As baterias podem promover continuamente a estabilidade de uma área da rede elétrica sobre funcionamento normal, através do fornecimento potência ativa quando há queda de frequência na rede.

Figura 15: Diferença na variação da frequência, comparando sistema com e sem armazenamento.



Fonte: (ESWF, s.d.)

SUPORTE DE TENSÃO

Assim como ocorre com a frequência, o operador do sistema de energia tem que garantir certo nível estável de tensão para o consumidor final. Isso envolve o controle de energia reativa de toda a rede, já que o desvio da tensão ocorre devido às inúmeras cargas indutivas e capacitivas conectadas. Tal serviço ancilar pode ser feito por máquinas geradoras que desvia parte de sua energia (ativa) disponível para fazer a compensação da energia reativa excessiva na rede.

O armazenamento de energia pode ser localizado muito próximo dos usuários finais para realizar esse serviço e liberar os geradores para geração exclusiva de energia ativa, tornando-os uma opção com resposta rápida que melhore a eficiência e dê suporte ao sistema.

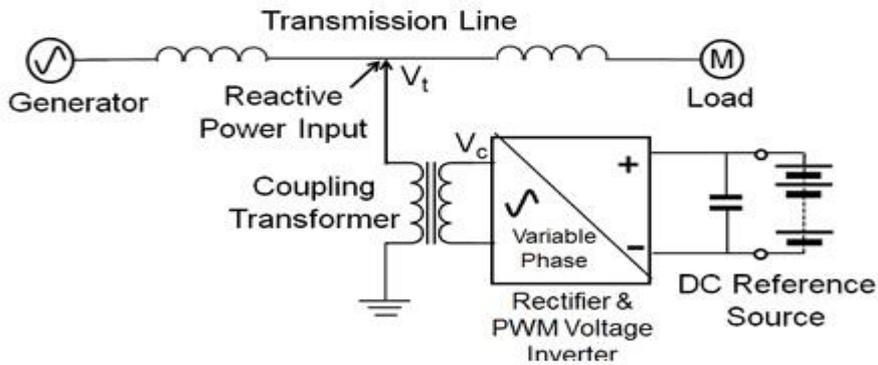
CONTROLE DE ENERGIA REATIVA

As cargas reativas utilizam a energia ativa para realizar trabalho de fato e energia reativa para excitação dos campos magnético ou elétrico; quanto maior for a parte reativa menor é a parte ativa. Para uma maior eficiência e aproveitamento dos recursos, o fator de potência deve ser igual a 1 ou próximo disso.

Os sistemas flexíveis de transmissão em corrente alternada (FACTS) são dispositivos projetados para compensar energia reativa da rede elétrica. O ponto chave para atender os requisitos de desempenho é um tempo de reação muito rápido, na ordem de dezenas de milissegundos. O armazenamento de energia é uma componente fundamental de muitos desses sistemas.

A compensação ativa do fator de potência é comumente implementada por meio do gerenciamento de energia reativa com o chamado “compensador síncrono estático” (STATCOM), que se comporta como um indutor ou capacitor variável. Em sua forma mais simples, é composto de um inversor de tensão controlado por tiristor que produz uma tensão CA (corrente alternada) com magnitude e fase variáveis.

Figura 16: Compensador Síncrono Estático com Baterias.



Fonte: (Woodbank Communications Ltd, s.d.).

A saída CA do inversor é conectada à linha de transmissão através do transformador de acoplamento. Observando a Figura 16, quando a tensão da linha (V_t) é maior que a tensão de saída do inversor, a carga está com comportamento capacitivo, o STATCOM fornece energia reativa indutiva, pode-se dizer que há a injeção de energia reativa indutiva para abaixar os níveis de tensão. Quando V_t é menor que a tensão de saída do conversor, a carga está com comportamento indutivo, o STATCOM fornece energia reativa capacitiva, e pode-se dizer que há absorção de energia reativa capacitiva para aumentar os níveis de tensão. Assim mantem-se os níveis de tensão em seu valor nominal e fator de potência unitário.

Ao conectar-se a um dispositivo adequado de armazenamento de alta densidade de energia, o STATCOM pode ser projetado para fornecer ou absorver potência ativa.

SUAVIZAÇÃO DE TRANSITÓRIOS

Durante a conexão ou desconexão de grandes blocos de carga, os níveis de tensão e corrente podem ser alterados rapidamente, causando possíveis problemas em outras cargas conectadas na rede básica.

O sistema de armazenamento pode fornecer a potência necessária para manter os parâmetros da rede elétrica estáveis durante esse período transitório, evitando maiores problemas para o consumidor e para a rede como um todo.

RESERVA DE ENERGIA

Um requisito crucial para as concessionárias de energia elétrica é manter o fornecimento de energia, mesmo se um gerador for desligado repentinamente, sem variação excessiva na frequência e no fluxo de energia. Geradores com reservas flexíveis tem capacidade de aumentar sua geração rapidamente, geralmente, a flexibilidade total é igual ou maior que 15% a 20% da

capacidade do sistema. Esses são utilizados para lidar com as variações repentinas da demanda, mantendo sempre o fornecimento de energia.

Muitas tecnologias possuem tempo de entrada variado, podendo ser de alguns segundos a vários minutos. As baterias estão entre os ativos de resposta mais rápida com tempos de entrada inferiores a um segundo e rampas transitórias igualmente rápidas, suprindo a carga por intervalos de tempo de minutos até algumas horas, mantendo a continuidade da energia até a normalização da unidade geradora ou estabilização do sistema.

AUXÍLIO NA PARTIDA DE MÁQUINAS GERADORAS

Quando se deseja colocar uma máquina geradora em operação, necessita-se excitá-la para que a mesma entre em sincronismo com a rede e opere nas condições nominais de fornecimento de energia elétrica.

As baterias são elementos autônomos que atuam independentemente da rede elétrica e assim podem alimentar uma partida a frio de um gerador base do sistema, bem como seus sistemas auxiliares associados, até que seja sincronizado com a rede.

POSTERGAÇÃO DOS INVESTIMENTOS DE INFRAESTRUTURA DA REDE ELÉTRICA.

Como a demanda por eletricidade tende sempre a aumentar, as concessionárias necessitam expandir sua rede para suprir esse fenômeno, construindo subestações, redes de transmissão e distribuição, alocando novos transformadores ou mesmo trocando antigos.

Adicionar armazenamento de energia localmente pode adiar ou até mesmo eliminar a necessidade dessas atualizações ou peças adicionais de equipamento. A introdução de um sistema de armazenamento tem dois benefícios principais: primeiro, a redução do investimento comparando-se uma nova subestação com um sistema de armazenamento de energia, e, segundo o mesmo sistema pode realizar outras tarefas que podem gerar maiores bônus.

ALÍVIO NO CONGESTIONAMENTO DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO

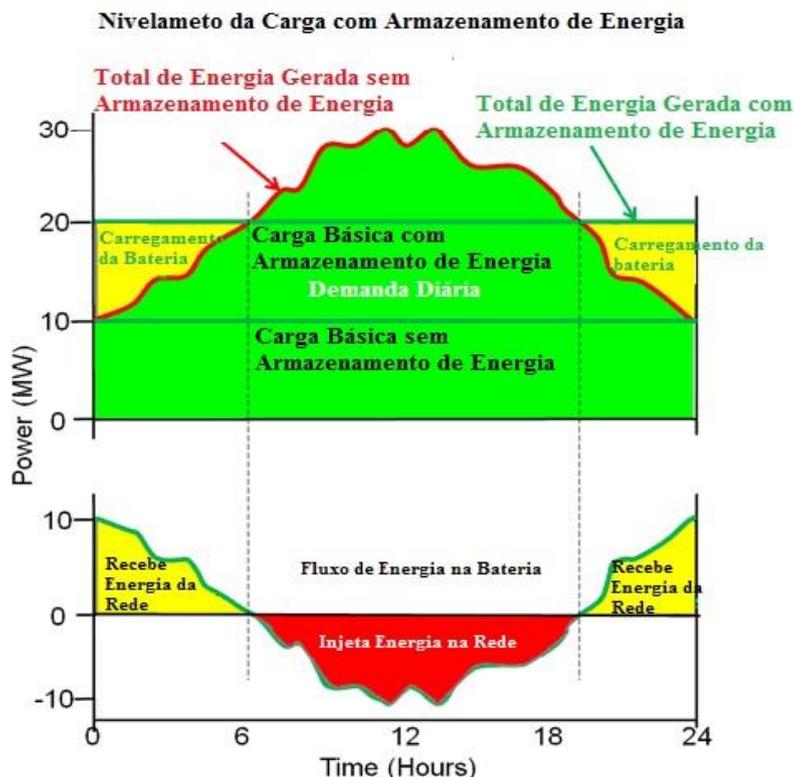
Durante certas horas do dia há um pico de consumo de energia elétrica, o que gera congestionamento para escoar a eletricidade. As concessionárias cobram valores mais altos para uso do fio nas horas de pico. Ao instalar baterias a jusante das seções de transmissão congestionadas, alivia-se esses ramos nos horários de pico.

NIVELAMENTO DE CARGA

O nivelamento de carga ocorre quando há um remanejamento no período de funcionamento das cargas, visando um funcionamento mais uniforme do sistema na demanda e na geração, sem períodos de pico. A solução utilizada para suprir os picos de demanda geralmente é a ativação de usina termelétrica. No que se refere a armazenamento de energia, a tecnologia tradicional é a usina hidrelétrica reversível (IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017).

As baterias têm atuação de maneira distribuída e não exigem condições geográficas específicas como as centrais hidrelétricas reversíveis. Portanto, o nivelamento de carga utilizando baterias, sugere o carregamento em períodos de menor demanda e preço e o descarregamento posterior nos períodos de maior demanda, mantendo um funcionamento uniforme do gerador de base e aumentando sua eficiência também. Deste modo há um deslocamento no perfil de demanda do sistema, não sendo necessário uso de usinas térmicas dispendiosas e há melhoria no fator de carga do sistema todo. A Figura 17 mostra como o armazenamento de energia pode eliminar a necessidade de aumentar a geração para suprir a carga nos momentos de pico, mantendo um nível constante na geração.

Figura 17: Nivelamento da carga.



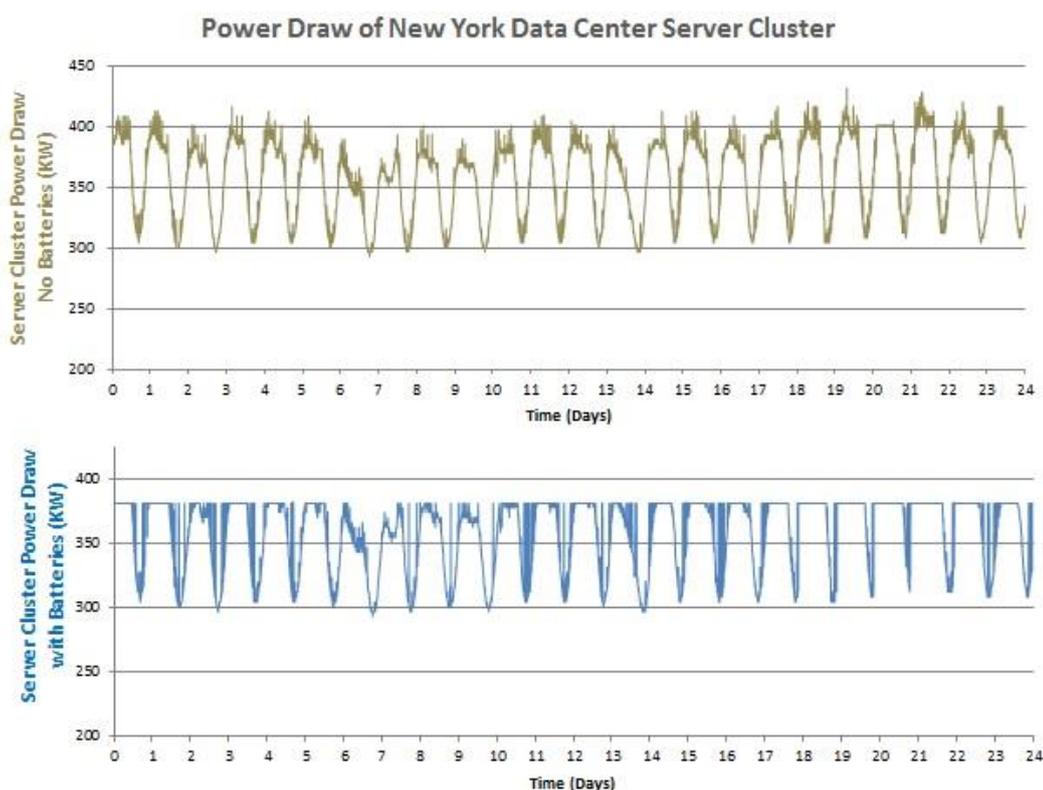
Fonte: (Woodbank Communications Ltd, s.d.)

GESTÃO DE DEMANDA CONTRATADA

Indústrias e empreendimentos comerciais com carga elevada pagam tarifas para o uso dos ativos da distribuidora. Caso a demanda ultrapasse o limite contratado, o consumidor é onerado com um acréscimo no valor da fatura. O sistema de armazenamento de energia com baterias pode ser utilizado para cisalhar os picos de ultrapassagem de demanda contratada, evitando ônus para o consumidor. Esse tipo de gestão de demanda normalmente é realizado através de desconexões de cargas ou uso de geradores auxiliares.

A Figura 18 é um exemplo desse tipo de gestão de demanda utilizando baterias. A aplicação foi utilizada por um *data center* em Nova York. A demanda de pico passou de 432kW para 381 kW. O carregamento ocorre quando a demanda é baixa, e o descarregamento ocorre quando a demanda atinge o limite.

Figura 18: Exemplo de gestão de demanda contratada.



Fonte: (Peill-moelter, 2012).

NEGOCIAÇÃO ARBITRÁRIA DE ENERGIA

A negociação arbitrária de energia ocorre quando se armazena energia nos horários de menor valor agregado, com baixa demanda, para utilização subsequente em períodos em que o

preço é maior. Essa prática ocorre em maior escala em mercados onde há variação horária de preço.

INTEGRAÇÃO COM FONTES RENOVÁVEIS INTERMITENTES

A integração de sistemas de armazenamento com fontes renováveis abrange uma série de aplicações. Um dos empecilhos causados pela introdução de fontes intermitentes na rede elétrica é a flutuação de curto prazo na geração de energia elétrica; assim, as baterias podem ser utilizadas para suavizar o aumento ou a queda na geração e manter estável o nível de tensão. Aumenta-se o aproveitamento dessas fontes, estocando energia nos momentos de geração excedente e despachando essa energia nos momentos mais oportunos. Auxiliam os geradores a suprir a demanda de ponta, promovendo o deslocamento no fornecimento de energia para atender a carga, evitando a utilização de usinas movidas a combustíveis fósseis. Tem a possibilidade de executar todos os serviços ancilares para a rede de transmissão.

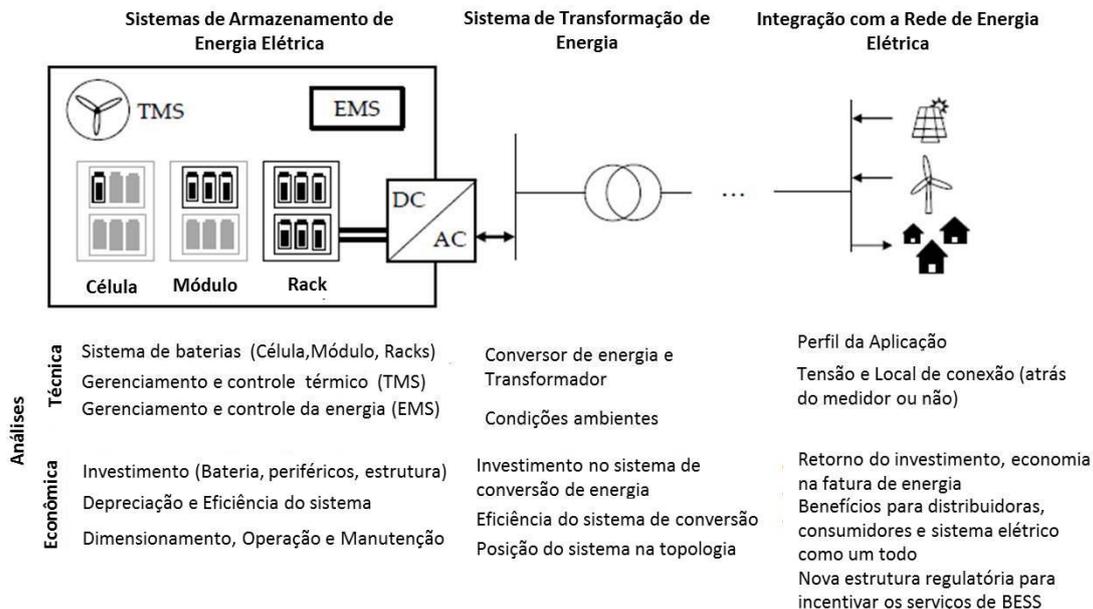
AUXÍLIO EM SISTEMAS ISOLADOS

Geralmente consumidores ou sistemas não conectados ao sistema de energia elétrico recorrem às fontes de combustíveis fósseis ou a fontes renováveis intermitentes ou não para prover energia térmica ou elétrica. Para garantir a segurança energética desses tipos de sistema e aumentar o nível dos recursos locais, o armazenamento de energia pode ser usado para preencher o vazio entre as fontes intermitentes e a demanda de energia elétrica, diminuindo o uso de termelétricas que poluem mais e tem maior custo operacional.

4. TOPOLOGIAS DE SISTEMAS MULTIFONOS COM BATERIAS

Ao estruturar um sistema de armazenamento utilizando baterias (BESS) analisam-se parâmetros técnicos chave, como energia armazenada, potência de despacho, tempo de atuação, tensão de conexão. A Figura 19 mostra um esquema geral de um BESS com os principais fatores técnicos e econômicos a serem observados na implementação de um recurso de armazenamento de energia.

Figura 19: Estrutura básica de um sistema de armazenamento.

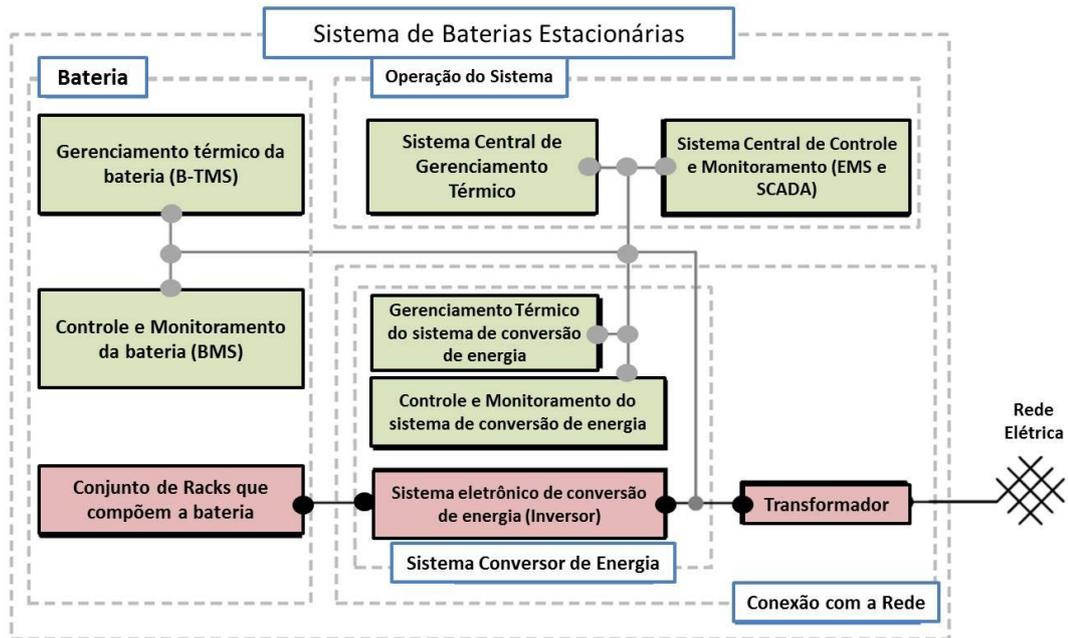


Fonte: (Hesse H. C., Schimpe, Kucevic, & Jossen, 2017)

Os aperfeiçoamentos das tecnologias de bateria e de seus periféricos permite especificar o tipo de sistema mais adequado para atender as aplicações para a rede elétrica ou consumidor. Assim, a escolha do sistema de armazenamento leva em conta a tecnologia que atenda as premissas de energia armazenada, área ocupada, potência de fornecimento, etc.

O diagrama da Figura 20 apresenta um esquema geral de um sistema de bateria estacionária, dividindo-o em três principais blocos: Operação do sistema, Bateria e Sistema de Conversão de Energia.

Figura 20: Diagrama de blocos de um sistema de armazenamento, com sinais de controle e potência.



Fonte: (Hesse H. C., Schimpe, Kucevic, & Jossen, 2017)

O bloco de **operação do sistema** é composto pelos Sistemas Centrais de Gerenciamento, Monitoramento, Controle e Sistema Central Térmico. O Sistema Central de Gerenciamento Térmico controla todas as funções relacionadas à climatização do sistema de baterias, ou seja, aquecimento, ventilação e condicionamento do ar. As tarefas do Sistema de Armazenamento de Energia (ESS, em inglês, *Energy Storage System*) são comandadas pelo EMS (*Energy Management System*), que tem a função de controlar o fluxo de energia, gerenciar o despacho da malha multifontes e realizar uma interface de outros sistemas como o BMS (*Battery Management System*) – monitoramento dos parâmetros de estado da bateria, e aplica os comandos do EMS na bateria -, SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), PCS (*Power Conversion System*) e sistema de climatização. Cabe ao operador programar as funções a serem realizadas, já que cada aplicação demanda uma determinada programação ou até mesmo outro tipo de sistema de gerenciamento e controle.

O bloco **Bateria** consiste nos três elementos mostrados na figura 20. Os conjuntos de racks são a união das células químicas que armazena energia através das conexões série e paralelo para atingir os níveis de tensão, corrente e potência solicitados. O BMS tem funções chave como proteger as células de operações prejudiciais em termos de tensão, temperatura e corrente para garantir uma operação segura e confiável do ESS. Também monitora parâmetros como resistência interna da bateria, número de ciclos, compara quanta energia a bateria

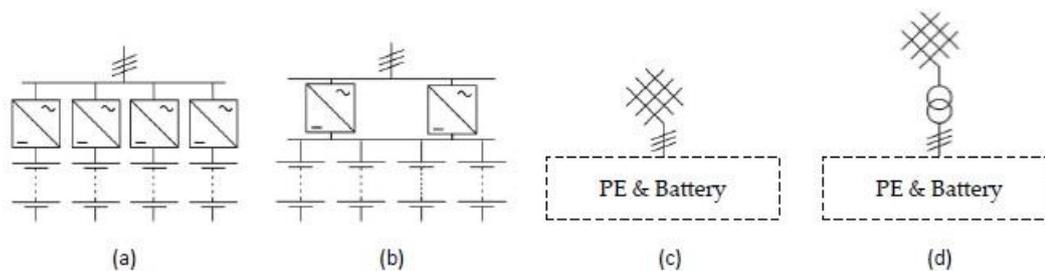
realmente armazena com o seu valor nominal, com a finalidade de determinar o estado da carga e o estado de saúde, realiza o balanceamento da tensão entre as células. Esses dados são repassados ao EMS que decide a melhor resposta para controle do fluxo de energia dentro dos limites da bateria. Há ainda o gerenciamento térmico da bateria, que regula a temperatura da célula de acordo com o que é especificado pelo fabricante, o que reduz os efeitos negativos ocasionados pela temperatura fora de padrão. Portanto, o controle térmico deste bloco tem a função de prolongar a vida útil da bateria e manter a segurança.

O último bloco básico da Figura 20 é o de sistema de conversão de energia, em que há um sistema eletrônico de conversão de energia (PCS) DC/AC (Corrente contínua/Corrente Alternada) e AC/DC, controlado pelo EMS. O PCS também é afetado pela temperatura, com o objetivo de manter os parâmetros elétricos nominais e de eficiência, portanto esse sistema também precisa ser monitorado e climatizado. Por fim, caso necessário, é introduzido um transformador para adequar a tensão de conexão do ESS à rede elétrica.

A Figura 21 mostra uma visão geral das topologias de conexão do ESS com a rede elétrica. A configuração (a) apresenta um modelo em que há diversos inversores com grupo de baterias dedicados e um barramento comum de conexão AC. Nessa opção, o fluxo de energia pode ser controlado através do acionamento individual de cada PCS, e há a possibilidade de os elementos conversores realizarem diferentes tarefas simultaneamente; caso ocorra alguma falha individual de banco de baterias, apenas um PCS cessa a operação, enquanto os outros mantêm ou até o mesmo substituem.

Já na configuração (b) ocorre a conexão dos racks de bateria em paralelo através de um barramento DC, assim todos os racks contribuem para o suprimento das entradas dos inversores. Essa topologia exige um sistema de monitoramento e gerenciamento (térmico e comandos) preciso, pois o desbalanceamento das células da bateria leva ao envelhecimento e fornecimento de corrente não uniforme das unidades da bateria. Caso ocorram falhas parciais do conjunto de racks que compõem o sistema de armazenamento, prejudica o funcionamento do PCS. Como não há dedicação exclusiva de um PCS por *string* de bateria, e, assim, redução no número de sistemas conversores de energia, o custo do sistema tende a ser menor e a eficiência de conversão de energia maior.

Figura 21: Esquemas de ligação entre PCS e Bateria.

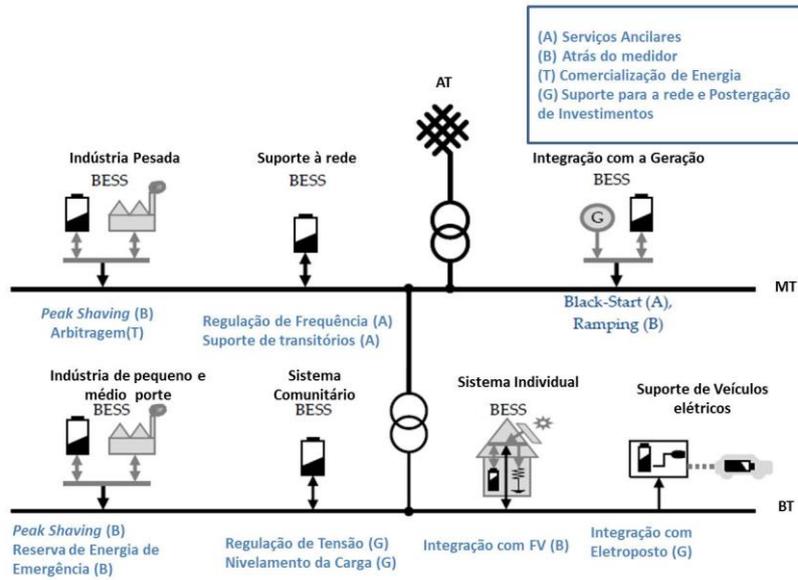


Fonte: (Hesse H. C., Schimpe, Kucevic, & Jossen, 2017)

Devido às diversas aplicações dos sistemas estacionários de bateria, a conexão com a rede elétrica pode ser diretamente através do PCS (Figura 21 (c)), geralmente em níveis de baixa tensão. Também pode ocorrer o acoplamento através de um transformador elevador ou abaixador, para adequar os níveis de tensão de saída do BESS com a rede elétrica, conforme Figura 21 (d).

Após toda visão geral de um BESS e sua integração com a rede elétrica nos distintos níveis de tensão, observa-se em (Chevron Energy Solutions Company, 2014), (Koller, Borsche, Ulbig, & Andersson, 2015), (Carter, et al., 2019) e (Princeton Power Systems, 2015) alguns exemplos que foram tomados como base para esse estudo, e que mostram aplicações de sistemas de armazenamento de energia em rede multifontes do lado da demanda, por isso são significativos para todo o trabalho, os estudos citados mostram algumas aplicações a serem consideradas para a definição do procedimento orientativo de utilização de um BESS. Um dos grandes desafios é mostrar ao consumidor que esse tipo de equipamento é uma solução energética que pode ser viável e trazer benefícios, assim é imprescindível abrir mercado e conscientizar os consumidores sobre esse tipo de solução. Dentro disso, com a finalidade de apresentar o ponto chave deste trabalho, a Figura 22 é uma amostra de como o armazenamento de energia pode atuar em diversos ramos da linha de distribuição e transmissão de energia elétrica, seja com serviços ancilares de suporte a rede ou mesmo atrás do medidor (do lado da demanda).

Figura 22: Estrutura de microrrede com baterias.



Fonte: (Hesse H. C., Schimpe, Kucevic, & Jossen, 2017)

5. SEGMENTAÇÃO DE MERCADO

Cada tecnologia de armazenamento possui uma faixa adequada de atuação, que depende do perfil da carga que será atendida. Portanto, há segmentos em que uma tecnologia apresenta melhor aptidão técnica quando comparada a outra. Isso ocorre também dentro de uma mesma tecnologia de armazenamento, no caso de estoque de energia em baterias químicas, existem várias tecnologias como: baterias de lítio, chumbo ácido, entre outras. Essas podem até ser concorrentes e disputar espaço enquanto outras estão obsoletas.

Buscando analisar as aplicações denominadas de “atrás do medidor”, ou seja, tarefas executadas especificamente a jusante do medidor de faturamento dos consumidores, a fim de obter benefícios econômicos e energéticos para os mesmos. As principais tarefas para baterias instaladas atrás do medidor são:

- **Qualidade de energia:** Consiste em utilizar o sistema de baterias para contornar as anormalidades corriqueiras da rede elétrica (GEPEA/USP, 2017). Exemplos dessas anormalidades são: queda repentina na tensão, devido a um curto circuito e reestabelecimento automático do sistema; queda na frequência devido ao repentino excesso de demanda do sistema. Tais fenômenos inesperados podem afetar processos de produção em indústrias, com prejuízo para a empresa.

- Deslocamento no horário de consumo de energia: Nesta aplicação, os consumidores utilizam o sistema de armazenamento para reduzir os custos totais com energia elétrica. Como existem períodos do dia em que a energia elétrica tem um valor agregado maior, há benefício econômico ao armazenar a energia em horários que a energia apresenta menor valor, utilizando-a posteriormente nos momentos de energia mais cara. O período de energia mais cara apresenta maior demanda por energia elétrica e é denominado horário de ponta (ou de pico), quando a demanda por energia é menor o preço também é menor e denomina-se horário fora de ponta (ou fora de pico).
- *Peak Shaving* (Controle de demanda): Toda unidade consumidora de energia elétrica utiliza-se do sistema de distribuição para receber a energia elétrica. Entretanto, existe um limite máximo de demanda solicitado pelo próprio consumidor, que se baseia em sua carga e em seu perfil de consumo para determinar tal parâmetro. Assim, quando o consumidor ultrapassa o limite de demanda estabelecido, o mesmo fica exposto ao pagamento de uma penalidade devido a ultrapassagem do valor de demanda contratada. Com um sistema de armazenamento é possível ceifar esses momentos de excesso de demanda, evitando as penalidades. Ainda utilizando essa função, é possível que o consumidor expanda sua carga sem aumentar a demanda contratada.
- *Backup* (Reserva de emergência): Determinadas instalações industriais e comerciais exercem atividades que não toleram interrupção de energia, torna-se indispensável uma reserva energética de emergência. Os sistemas de bateria apresentam resposta rápida para reestabelecimento energético e se tornam uma boa opção para não interromper por longos períodos os processos que ao cessarem causam prejuízo, ou insegurança em determinados locais.

Outras funcionalidades ainda podem ser executadas atrás do medidor como regulação de frequência, tensão da rede elétrica e a resposta da demanda. Sistemas que executam tais tarefas podem ter uma sinergia com a distribuidora de energia elétrica, na Austrália já existem consumidores com sistemas que promovem serviços ancilares e são remunerados pela prestação de serviço (ESWF, 2014). No Brasil as normas ainda não consideram tais serviços ancilares executados por sistemas de baterias instalados em consumidores.

5.1. IDENTIFICAÇÃO DE CLIENTES POTENCIAIS

O nicho de mercado com maior potencial de exploração é o de consumidores comerciais e industriais, conectados em média tensão, pois, apresentam consumo de energia considerável ficando expostos a possíveis modalidades tarifárias e necessitam de estabilidade e segurança no suprimento de energia elétrica. Atualmente esse grupo utiliza de outras ferramentas para executar as tarefas mencionadas, como por exemplo, gerador a diesel ou a gás para executar o deslocamento da demanda de ponta e desligamento de cargas para realizar o *peak shaving*. Considerando que tais medidas envolvem custo com combustível e possível pausa na linha de produção devido ao desligamento de máquinas, o sistema de baterias é uma solução ao realizar tais atividades de maneira menos onerosa para o proprietário, e proporcionando menos poluição atmosférica e sonora, devido aos baixos índices de emissão de ruídos e gases exaustos.

Outro fator que torna esses grupos atrativos é que possui amplo espaço para exploração de mercado, já que existem poucas instalações com armazenamento de energia em unidades consumidoras. Segundo (Global Market Insights, 2023) foram investidos 19,1 bilhões de dólares, ao redor do mundo, em baterias estacionárias atrás do medidor no ano de 2022, e a previsão é de aumentar o investimento em 23% até 2032. Em alguns países existem políticas e medidas que incentivam a instalação deste tipo de sistema por parte de consumidores, que vão além apenas da arbitragem na gestão de energia, como a criação de mercado de serviços ancilares. Com isso, uma bateria instalada do lado da demanda pode ser utilizada para promover a estabilidade da rede elétrica e o proprietário do sistema de armazenamento é remunerado pelo serviço.

Analisando o cenário Brasileiro, ainda não há abertura para este tipo de medida. Assim, tornam-se o foco deste estudo a elaboração de procedimento para atender tecnicamente unidades consumidoras com sistemas de armazenamento de baterias de lítio no Brasil.

5.2. CONSUMIDORES INDUSTRIAIS E COMERCIAIS NO BRASIL

Segundo as normas Brasileiras (ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010) os consumidores comerciais e industriais se enquadram em uma faixa de tensão de 2,3kV até níveis superiores a 230kV. O nível de tensão solicitada pelo consumidor varia conforme sua carga instalada, ou seja, consumidores com maiores níveis de tensão apresentam cargas com potência instalada maior e os níveis de tensão menores apresentam menor potência, com mínimo de 30kW instalados. Consumidores com demanda a partir de 500kW tendem a migrar para o mercado livre de energia, pois apresenta uma oportunidade de economia na fatura de

energia elétrica. Já os consumidores do grupo A que apresentam potência instalada menor que 500kW são obrigados a comprar energia do mercado regulado, da distribuidora local, escolhendo entre as tarifas convencional binômia, verde ou azul. A Tabela 9 apresenta um resumo dessas três modalidades tarifárias.

Tabela 9: Resumo das modalidades tarifárias para consumidores do grupo A

Modalidade Tarifária	Demanda	Consumo
Binômia	Tarifa única	Tarifa única
Azul	Tarifa para horário de ponta e outra para horário fora de ponta	Tarifa para horário de ponta e outra para horário fora de ponta
Verde	Tarifa única	Tarifa para horário de ponta e outra para horário fora de ponta

Fonte: (ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010)

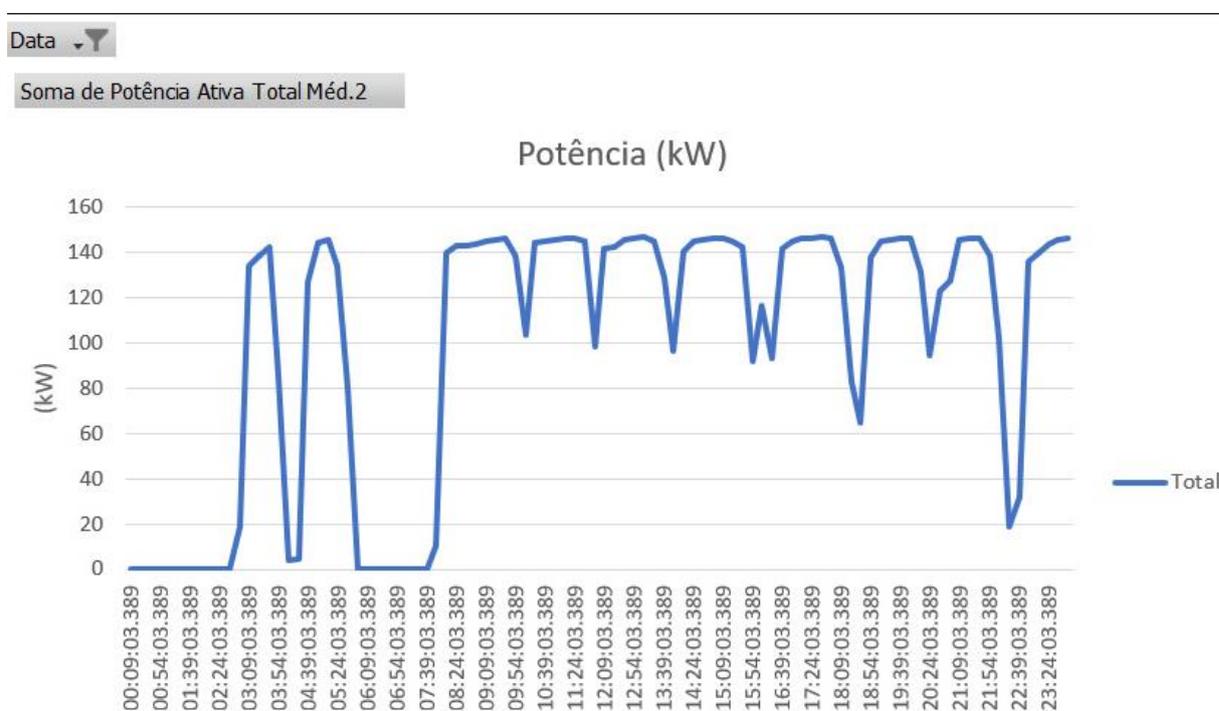
Na Tabela 15 observa-se distinção dos postos tarifários de ponta e fora de ponta, em que nos horários de ponta a energia possui valor mais alto, devido ao maior fluxo de energia nesse momento. Portanto em tal período, o consumidor paga mais pela energia consumida e dependendo da modalidade tarifária, pela demanda contratada ou tarifa de uso de sistema de distribuição (TUSD). Nesse cenário, verifica-se como uma oportunidade para utilização de baterias, o estoque de energia no horário fora de ponta e o despacho nos horários de ponta, obtendo benefício econômico. Como já foi citado, ainda há mais algumas tarefas atrás do medidor que se tornam atrativas para consumidores e se enquadram em oportunidades para o mercado Brasileiro.

Entretanto, ainda não há regulação nacional que definam os parâmetros técnicos para instalação desse novo elemento. Assim, a norma mais próxima e aplicável para esta tecnologia é a lei 14.300, que regula as instalações de geração distribuída no país, e propõe que o limite da instalação seja o mesmo valor da demanda contratada e um sistema de compensação de energia do tipo *net metering*, que consiste no sistema de créditos de energia para abatimento na fatura.

Analisando as características das normas Brasileiras, tem-se que os consumidores do mercado cativo ou livre, do grupo A, que pretendem realizar o corte do consumo de pico, a possibilidade de melhorar a qualidade da energia, gestão da demanda e ainda ter uma reserva energética de emergência são os clientes potenciais para instalação de sistemas de armazenamento de energia distribuídos.

É necessário analisar cada caso para sugerir a aplicação do sistema de baterias como uma solução energética. A Figura 23, por exemplo mostra a operação de um forno de indução de uma fábrica na região de Limeira – SP. O Forno é a maior carga individual da fábrica, opera três turnos, com parada da 00:00 às 3:00. O horário de pico da distribuidora da região é entre 17:30 e 20:30, horário em que o forno está atuando. Assim, o sistema de armazenamento de energia com baterias poderia ser uma solução para deslocar o consumo do horário de pico para o horário de parada do forno de indução, sem alterar a rotina do equipamento e da fábrica como um todo.

Figura 23 – Operação diária de forno de indução em indústria metalmeccânica



Fonte: próprio autor

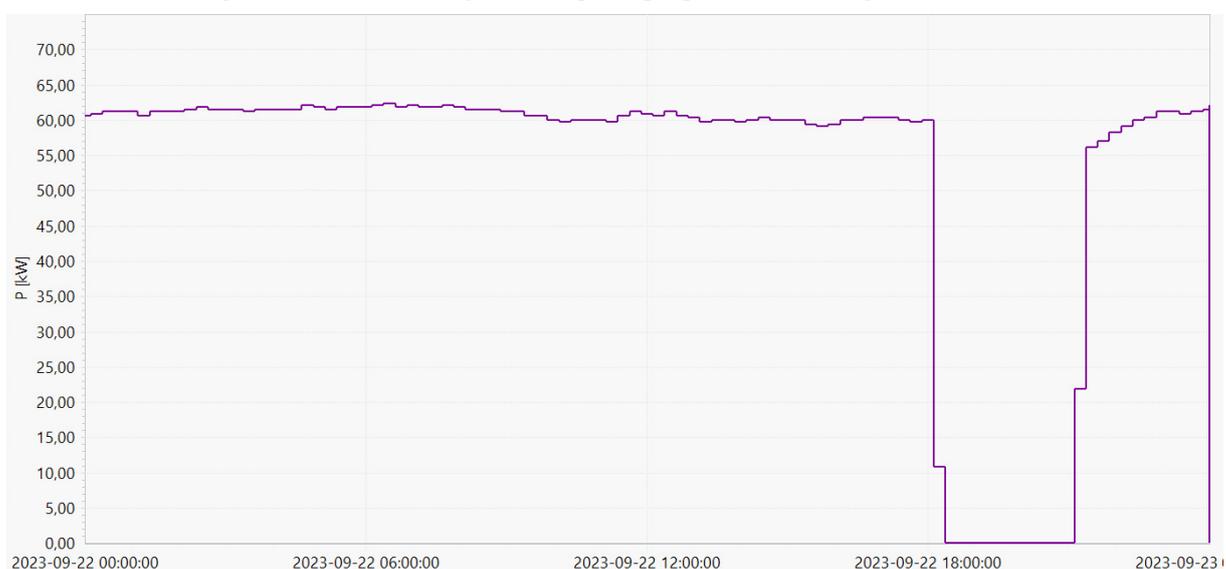
Além disso, essa fábrica da região de Limeira possui usina fotovoltaica instalada, ao qual não pode aproveitar o excedente de geração devido a migração para o mercado livre de energia (Lei 9.074/1995) como consumidor livre, ou seja, a energia fotovoltaica é consumida diretamente na fábrica e aos finais de semana, a energia exportada para rede, não é contabilizada. Essa energia poderia ser armazenada no sistema de baterias.

Outra forma de aplicação é em indústrias do setor do plástico, em que se faz o “*set-up*” de máquinas extrusoras, injetoras e/ou sopradoras. Esse procedimento é trabalhoso (Alves, PASA, & Cecchetti, 2014) e no caso de uma queda de energia, é necessário reconfigurar as máquinas para ajustar o tempo de processo, de injeção, etc.. O BESS atua, evitando a perda de

programação das máquinas e mitiga os desperdícios de matéria prima nestes momentos de falha de energia.

Outro exemplo de caso em que pode ser aplicar o armazenamento de energia como uma solução energética é uma indústria têxtil, que produz fios de algodão e sua principal máquina é desligada no horário de ponta, das 18:00 às 21:00 para evitar maiores custos. Porém a empresa perde quatro horas e trinta minutos de produção, sendo três horas do horário de pico, mais uma hora e meia para o set-up da máquina. A Figura 24 mostra o perfil de consumo diária desta máquina.

Figura 24 – Perfil de atuação de máquina que produz fios de algodão.



Fonte: próprio autor

Essa fábrica, possui sistema fotovoltaico e a energia excedente é compensada pelo sistema “*net metering*”. O excedente poderia ser estocado para ser utilizado durante horários de pico para a máquina que produz fios não desligasse durante 3 horas e fazendo a indústria perder quatro horas e meia de produção.

Dentro da ampla gama de indústrias e prédios comerciais existentes, é possível verificar aplicações razoáveis que melhoram o desempenho da fábrica e economizam energia. Isso pode justificar a utilização de sistemas multifontes com baterias do lado da demanda.

6. PROCEDIMENTO ORIENTATIVO PARA ELABORAR UMA SOLUÇÃO MULIFONTES

Ao estudar topologias de microrredes com sistemas de armazenamento integrado e as necessidades dos consumidores, verifica-se a importância das baterias como um item chave

para mitigar custos e melhorar o desempenho produtivo. Pode-se aumentar o aproveitamento de fontes renováveis, realizar serviços de gerenciamento de energia para diminuir o custo com energia. Dentro disso, é possível diminuir a utilização de geradores a diesel, mitigando as emissões de gases de efeito estufa.

Ao incorporar uma bateria à uma malha multifontes, é necessário se atentar para a norma vigente local e fazer com que a bateria realize serviços que geram remuneração e mantenham a qualidade de energia para o consumidor. Países como Austrália (Energy Storage World Forum, 2014) e EUA possuem regulamentação específica para incentivar a utilização desses sistemas de armazenamento para regulação de frequência, tensão e demais serviços ancilares. Outro ponto regulatório é a tarifação horária, que permite maiores possibilidades para executar a arbitragem.

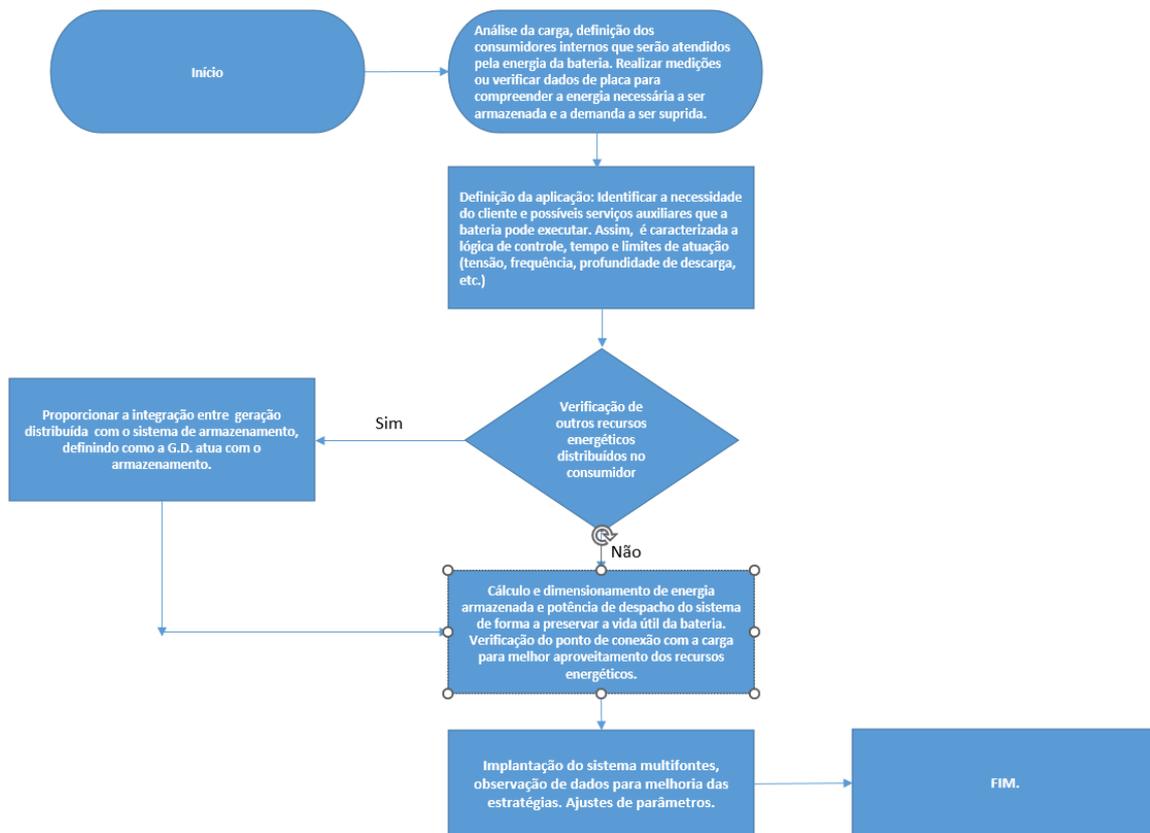
No Brasil, ainda não há nenhuma regulação para remunerar serviços ancilares feitos por baterias. Portanto, os benefícios que são considerados para se aplicar um BESS no Brasil giram em torno do deslocamento do horário de ponta, aumento do aproveitamento de recursos fotovoltaicos e eólicos, *peak shaving*, e reserva de emergência. Com a finalidade de elaborar uma estrutura de lógica para montagem de um sistema de armazenamento a ser instalado do lado da demanda, que tenha ou não outras fontes energéticas, a seguir são mostrados passos chaves para a escolha de uma topologia com sistema de armazenamento.

1. Análise da carga: O primeiro passo é identificar o comportamento da instalação da carga alvo, verificando o perfil diário de demanda e consumo do equipamento específico ou de toda a instalação. Dessa forma é possível dimensionar os componentes de armazenamento e conversão energética. A segregação em cargas críticas pode reduzir o tamanho da bateria ou influenciar no tempo de atuação para manter energia apenas em equipamentos que são imprescindíveis, otimizando o dimensionamento dos componentes de um BESS. Caso o sistema não atenda toda a instalação, a conexão pode ocorrer no painel de distribuição próximo da carga ou no painel geral.

2. Definição da aplicação: Neste passo é a ideia é identificar a necessidade do cliente e as possibilidades de atuação do sistema de armazenamento. Aqui, é definido como o sistema se comporta, sua lógica de controle em relação ao sistema multifontes, período de operação, limites de tensão e frequência. O número de descargas é outra consequência da escolha das aplicações, ou mesmo da quantidade de funções que a bateria exerce. Outro fator que deve ser pensado é a profundidade da descarga, ou seja, o quanto a bateria descarrega para cumprir seu papel.

3. Fontes energéticas: Em alguns casos, no consumidor, podem existir geradores a diesel, fotovoltaicos, eólicos, entre outros que podem atuar integrados com o sistema de armazenamento para carregar a bateria em momentos de geração excedente. Essa integração pode ocorrer em barramento DC ou AC. A operação em conjunto é definida no algoritmo do software de controle da microrrede. Portanto, ao se escolher a capacidade de uma bateria, leva-se em consideração se há participação de outros recursos energéticos distribuídos e onde é sua conexão elétrica, para verificar os fluxos de potência.
4. Capacidade de armazenamento e potência da bateria: Para a definição da capacidade e potência da bateria deve ser realizada análise da carga, conforme item 1, através de medições ou estimativas por dados de placa de equipamentos. A partir disso, deve ser considerada a faixa de atuação da bateria, por exemplo de 20% a 90% de SOC (bateria irá atuar entre 20 e 90% da carga). Ao final do dimensionamento, tem de ser levado em consideração os equipamentos auxiliares e perdas, dado informado pelo fabricante. A partir disso, é feita a definição do local de conexão do sistema de armazenamento, observando o circuito existente.
5. Implantação do sistema multifontes: Etapa em que contempla a instalação do sistema multifontes baseados nos passos anteriores. Ocorre a verificação de dados com o sistema operando, e, assim, propõe-se melhores na lógica de controle e despacho do sistema de armazenamento ou da atuação das demais fontes energéticas.

Figura 25 - Fluxograma para definição de um sistema de armazenamento de energia.



Fonte próprio autor.

Ao final desses cinco passos, tem-se a capacidade de armazenamento, as cargas que serão supridas, o tempo atuação da bateria, a faixa de carga, lógica de controle, ponto de conexão dos elementos que compõem o sistema multifontes e todas as definições de utilização dos recursos, assim como monitoramento para aplicar melhorias.

7. ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO

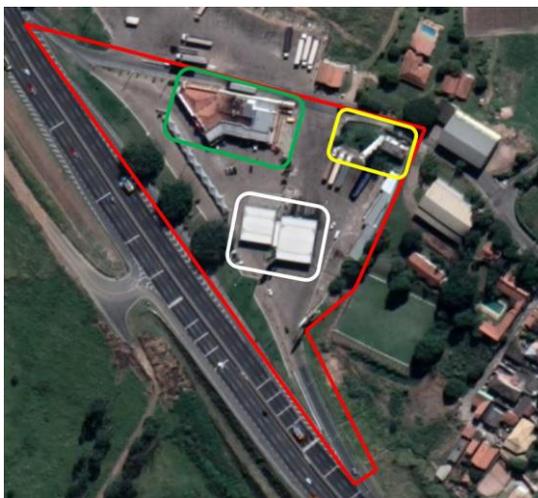
Esse trabalho apresenta um estudo de caso em um consumidor do grupo A4 do mercado cativo, com a finalidade de dimensionar uma bateria estacionária que atenda às funções principais de reserva energética (*backup*) e deslocamento do horário de ponta (*energy time-shift*), é levado em conta principalmente a quantidade de energia para suprir toda a carga do estabelecimento durante o horário de pico. Segundo a fatura de energia do local a frequência e duração de interrupção da rede apresenta baixos níveis, assim, o dimensionamento da quantidade de energia da bateria gira em torno da operação na ponta e da demanda máxima que ocorre no local.

A tecnologia química, ou seja, o tipo de bateria utilizada pode variar: a escolha deve passar por análises da profundidade de descarga, espaço ocupado, eficiência durante o processo de conversão de energia, envelhecimento, número de ciclos de carga e descarga e econômica, buscando o melhor custo benefício. As baterias de lítio demonstram maior aptidão nessas condições, além de menor custo, observado em (ESWF, 2018) e (Baxter & Byrne, 2020).

7.1. CARACTERÍSTICAS DO CONSUMIDOR

A sistemática para a escolha dos elementos de um sistema de armazenamento inicia-se pela análise da carga, ao observar quais são as cargas do consumidor e o perfil de consumo dessas. No projeto piloto, (Projeto estratégico ANEEL PD 00063-3025/2016) o consumidor é localizado na rodovia Anhanguera (SP-330), na cidade de Jundiaí-SP. A Figura 26 ilustra a localização da unidade consumidora do projeto piloto. São destacadas três áreas principais: em vermelho a área total do empreendimento; em verde a localização do restaurante/conveniência; em branco o local referente ao posto de combustível; em amarelo o lugar onde se encontra o gerador à diesel, ramal de entrada, posto de transformação (13.8kV/220V) e sistema de medição para faturamento.

Figura 26: Localização do consumidor da unidade piloto



Fonte: (Google Maps, s.d.)

A fatura de energia da unidade consumidora (Piratininga, Maio/2018) indica que a classificação tarifária do empreendimento é tarifa verde-A4, tipo comercial atacadista/varejista, conforme resolução normativa 414/2010 (ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010) e suas posteriores revisões da ANEEL. Portanto, o consumidor é sujeito ao pagamento de uma tarifa única para demanda (R\$/kWh); tarifa diferenciada para horário de ponta e fora de ponta

no período úmido; tarifa diferenciada para horário de ponta e fora de ponta no período seco (ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010).

7.2. CARGA INSTALADA E DEMANDA

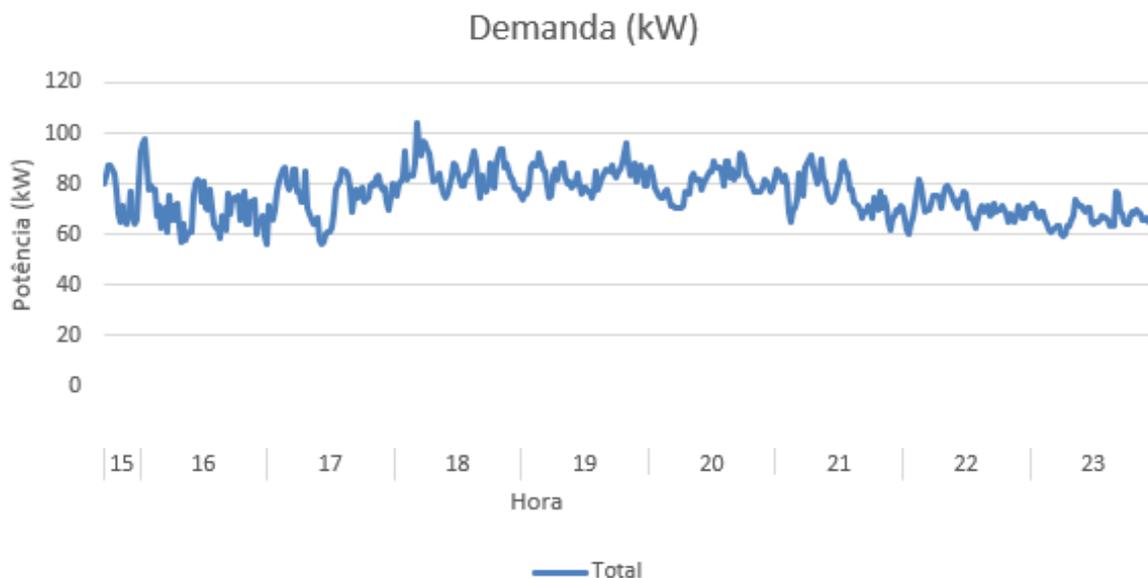
A partir do ramal de entrada, o circuito geral de alimentação do empreendimento é subdividido em dois circuitos: Restaurante e Posto de combustíveis.

As cargas do posto de combustíveis são subdivididas em quatro circuitos, e os equipamentos do restaurante são separados em dez circuitos.

No decorrer da caracterização da carga não se identificou nenhum equipamento sensível a distorções harmônicas da rede elétrica. A unidade consumidora também possui um banco de capacitores para correção do fator de potência.

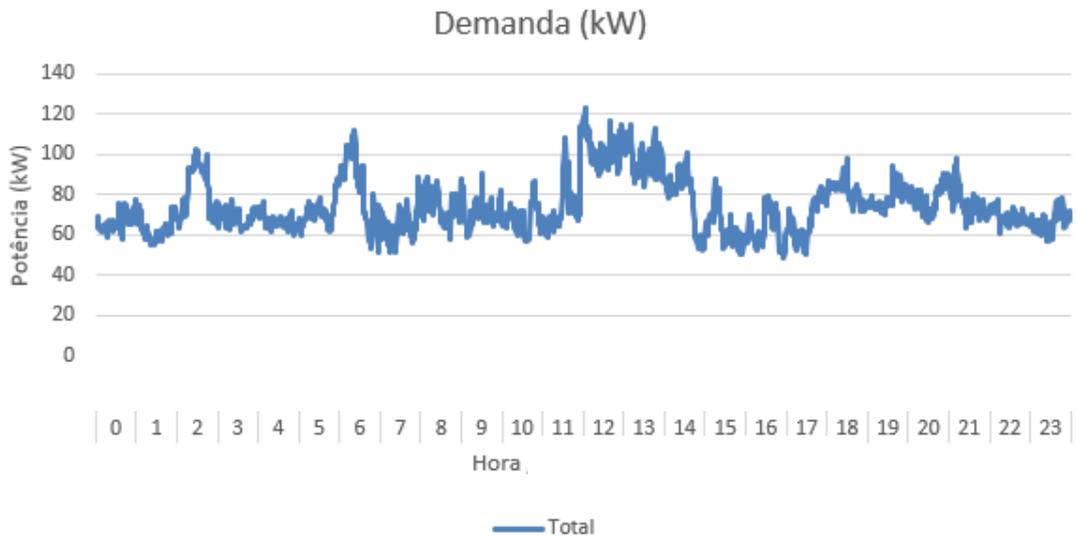
Para verificar a demanda do local, foram instalados medidores de qualidade de energia na entrada geral e no painel do restaurante. Os dados do painel do posto de combustíveis são obtidos através da diferença entre painel geral e painel do restaurante. As Figuras 27, a 35, mostram a demanda total do local.

Figura 27 – Medições de demanda total para dia 11/05/2018, não foi medido o dia todo.



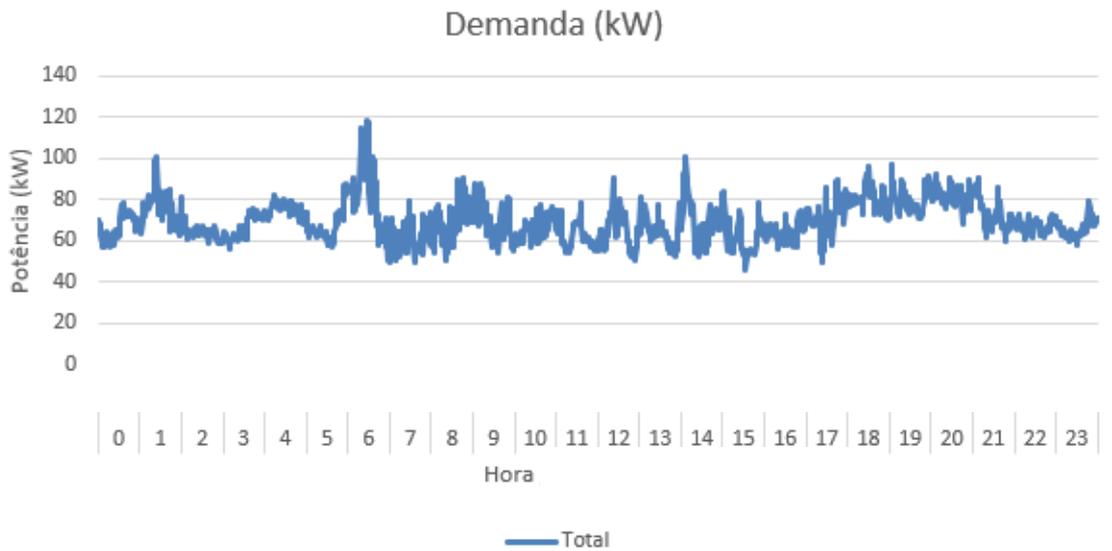
Fonte: Próprio autor

Figura 28 – Medições de demanda total para dia 12/05/2018.



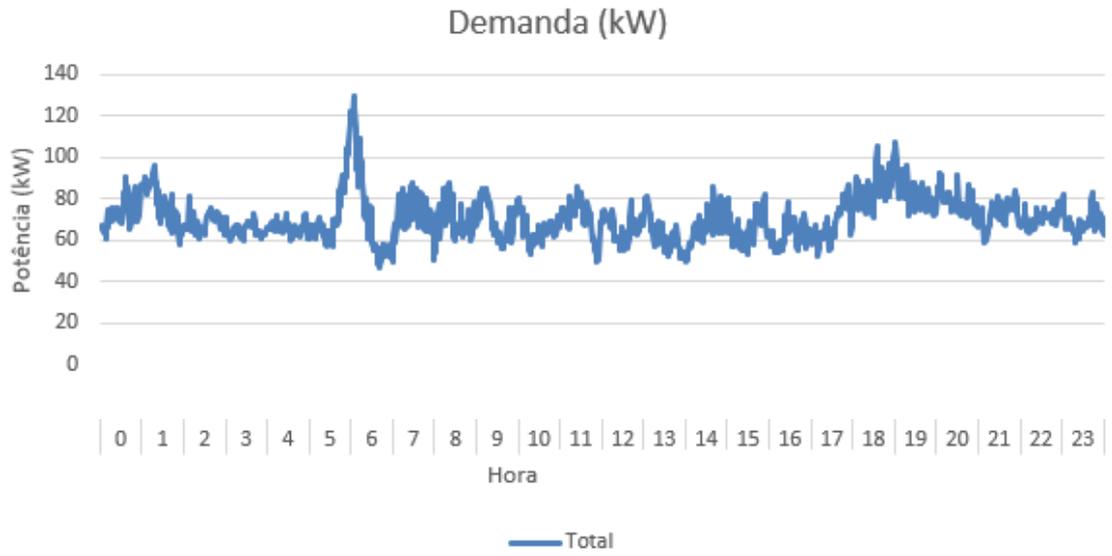
Fonte: Próprio autor

Figura 29 – Medições de demanda total para dia 13/05/2018.



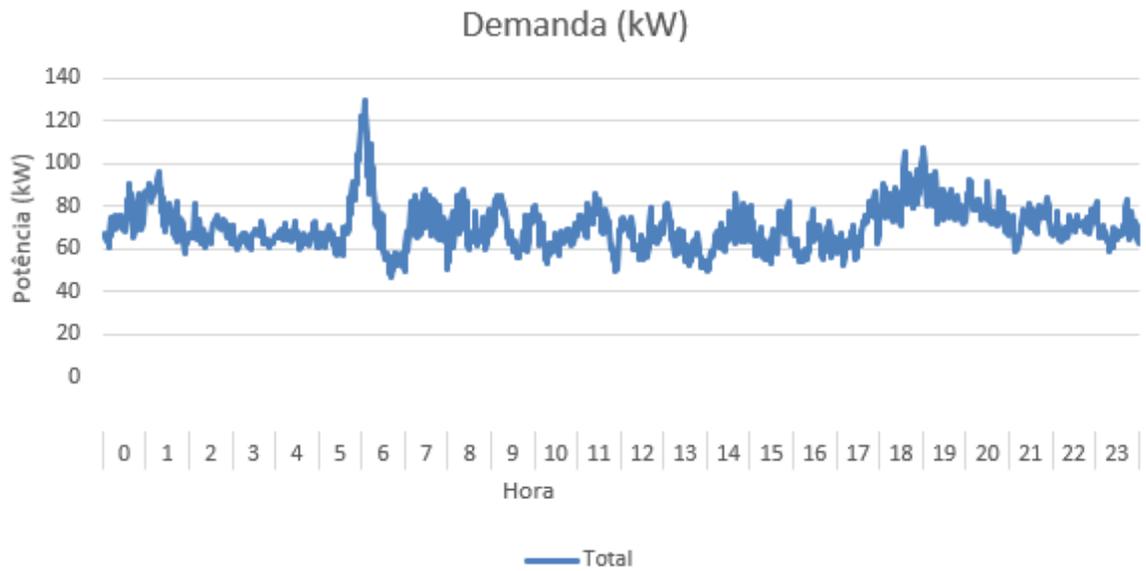
Fonte: Próprio autor

Figura 30 – Medições de demanda total para dia 13/05/2018.



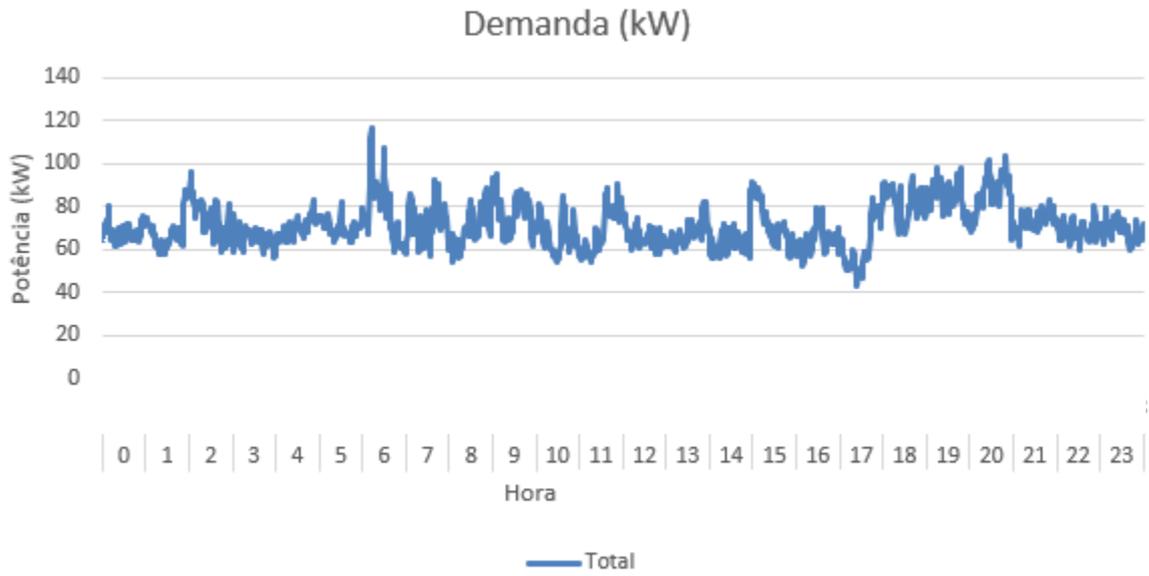
Fonte: Próprio autor

Figura 31 – Medições de demanda total para dia 14/05/2018.



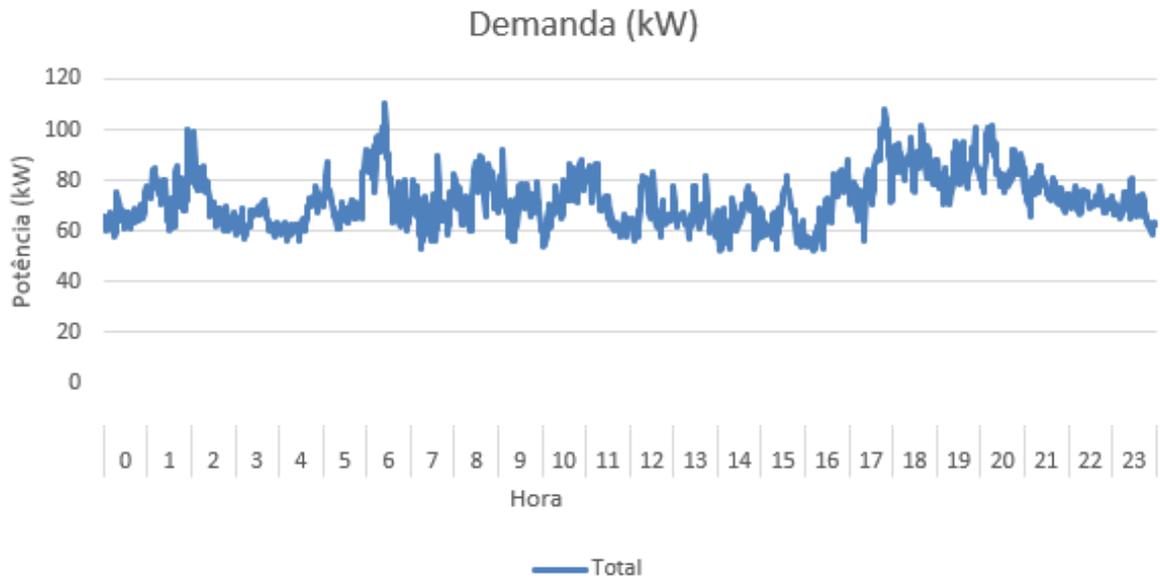
Fonte: Próprio autor

Figura 32 – Medições de demanda total para dia 15/05/2018.



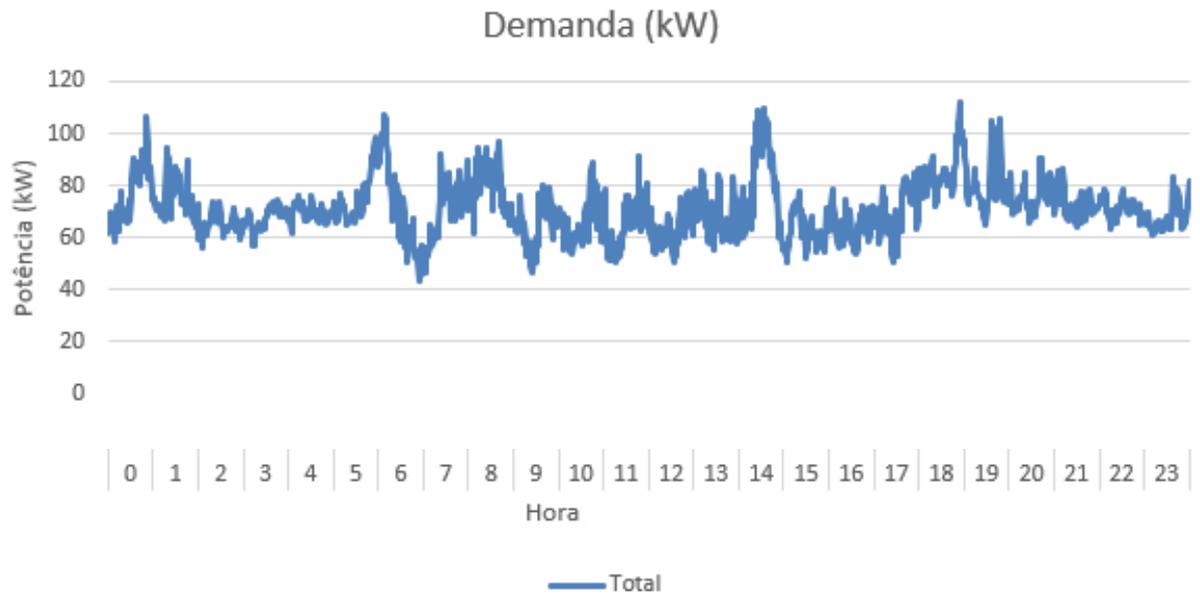
Fonte: Próprio autor

Figura 33 – Medições de demanda total para dia 16/05/2018.



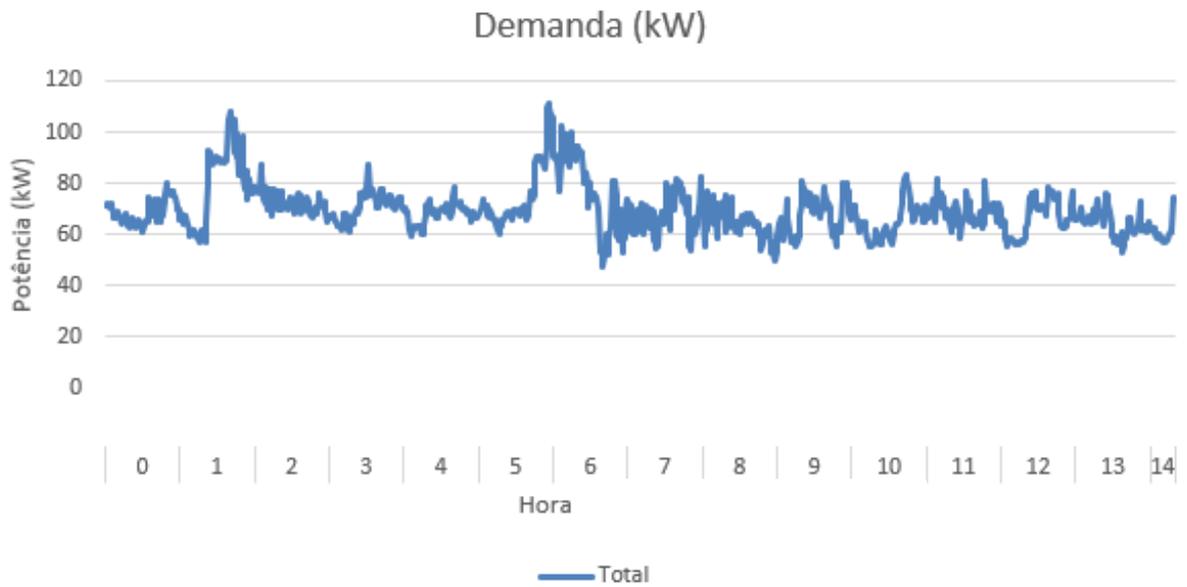
Fonte: Próprio autor

Figura 34 – Medições de demanda total para dia 17/05/2018.



Fonte: Próprio autor

Figura 35 – Medições de demanda total para dia 18/05/2018.



Fonte: Próprio autor

Vemos que em alguns momentos a demanda total atinge valores de aproximadamente 130kW. Quanto a energia consumida, a Tabela 10 apresenta os parâmetros para o período no horário de ponta para os dias analisados.

Tabela 10: Consumo total da unidade durante o horário de ponta de 11/05/2018 a 17/05/2018

Dia Analisado	11	12	13	14	15	16	17
Consumo na ponta(kWh)	247,22	237,61	241,98	245,88	252,04	257,42	242,15

Fonte: Próprio Autor

Verifica-se que o maior consumo ocorre no dia 16 de maio, com 257,42 kWh na ponta e o menor é de 237,61 kWh. A média de consumo, considerando os dias analisados, é de 246,33 kWh. Esses dados norteiam a definição do quanto de energia a bateria deve armazenar de energia para suprir a carga energeticamente.

7.3. GERADOR A DIESEL

As instalações elétricas ainda incluem um gerador a diesel (Grupo Motor-Gerador – GMG) para operação no horário de ponta, a fim de evitar o uso da energia elétrica da rede elétrica da distribuidora local nos momentos em que a tarifa tem maior valor e obter certo benefício econômico, ou em caso de falha no fornecimento de energia elétrica. A operação desse elemento ocorre de forma automática: há desconexão completa entre unidade consumidora e rede elétrica, e, após um curto intervalo de tempo de seis a dez segundos, o GMG é interligado à carga. Concluído o horário de ponta, o gerador é desativado e a rede elétrica volta a alimentar a carga.

Os principais dados do GMG instalado são (GERADORES, Catálogo Comercial Grupo Gerador Diesel):

- Grupo Gerador STEMAC n° 0340344606
- Modelo: ST2130
- Motor à diesel: Mercedes – Modelo OM 447LA506
- Gerador: Cramaco – Modelo G2R
- Potência: 340/310 kVA
- Tensão nominal: 220V
- Corrente nominal: 816A

- Frequência nominal: 60Hz
- Fator de potência: 0,8
- Rotação: 1800 RPM
- USCA: Singelo

A Figura 36 apresenta a imagem do catálogo do GMG instalado no local, junto com seu quadro de comando, que possui também intertravamento para que não se tenha operação em paralelo com a rede. Segundo o manual (GERADORES, Manual de comandos elétricos dos módulos ST2030/ST2040/ST2130) também tem a possibilidade de comunicação com computador, através de uma interface serial, para acionamento remoto.

Figura 36: Módulo de controle ST2130 e GMG, presentes na unidade consumidora.

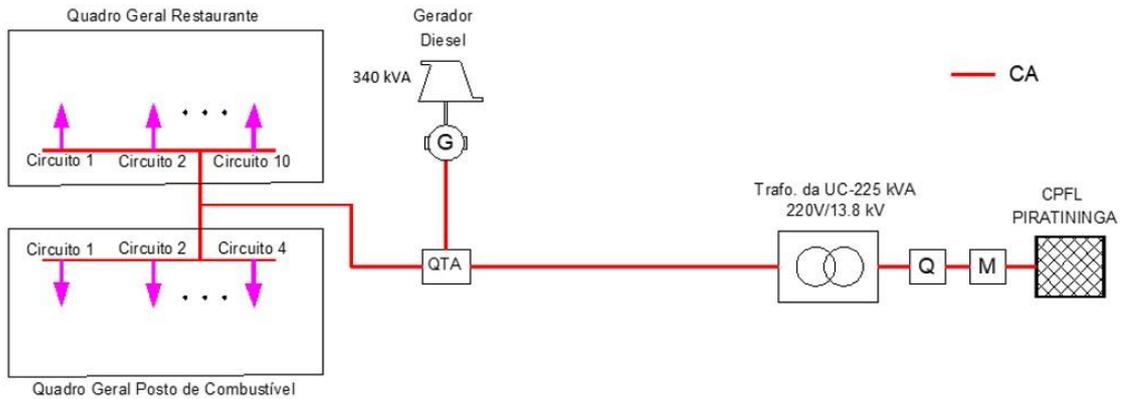


Fonte: (GERADORES, Catálogo Comercial Grupo Gerador Diesel) (GERADORES, Manual de comandos elétricos dos módulos ST2030/ST2040/ST2130)

7.4. DIAGRAMAS DA INSTALAÇÃO

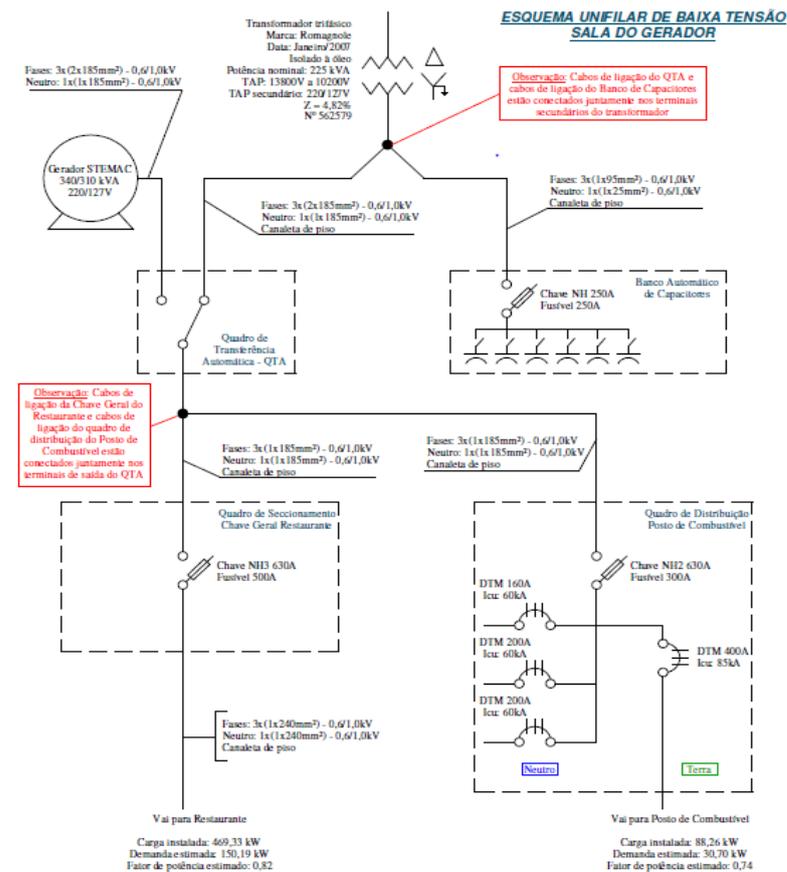
As Figuras 37 e 38 esquematizam, de maneira simples, como é a instalação elétrica da unidade consumidora antes da instalação do sistema de armazenamento. Assim, é feita a análise da carga para verificar qual o melhor local de conexão do sistema de armazenamento no consumidor.

Figura 37: Diagrama representativo da instalação elétrica da unidade consumidora



Fonte: Próprio Autor

Figura 38: Diagrama unifilar detalhado da cabine de entrada da alimentação, após o transformador abaixador AT/BT¹ de entrada da unidade consumidora.



Fonte: (Fontana, Dezmebro 2018)

7.5. OUTRAS CONSIDERAÇÕES

Com o levantamento das informações da carga feito, a análise seguinte é sobre a aplicação desejada para o Sistema de Armazenamento de Energia (ESS, em inglês *Energy Storage System*) e, tempo de atuação da bateria, tamanho do sistema de armazenamento (kWh) e do sistema de conversão de energia (kW) bem como o tipo de tecnologia desses elementos.

No local ainda existe um eletroposto cuja carga corresponde a 45kW, que não foi possível identificar nas medições, pois, possivelmente não ocorreu carregamento de carros elétricos no local durante o período de medição. Assim, no pior caso, para efeito de dimensionamento do sistema de armazenamento de energia, é prudente somar a maior demanda registrada com a demanda deste item, assim como a energia consumida pelo mesmo.

7.6. CARACTERÍSTICAS DA APLICAÇÃO

As aplicações definidas para o projeto piloto exercem dois tipos de serviço de gestão de energia para a unidade consumidora, são eles:

- Deslocamento no horário de consumo de energia: utiliza o sistema de armazenamento “atrás do medidor” para redução dos custos totais da fatura de energia elétrica ao se utilizar a rede básica como fonte energética (GEPEA/USP, 2017). Atualmente, dado os custos com energia no horário de ponta, o cliente utiliza o gerador a diesel para exercer essa função, assim, a comparação econômica deve ser feita levando em consideração o preço do diesel utilizado pelo gerador, que na semana de 17/03/2019 a 23/03/2019 apresentou um valor médio de R\$ 3,577 (Agência Nacional do Petróleo, s.d.). Durante o horário de ponta o fornecimento de energia para a carga é de responsabilidade da bateria e nos períodos fora de ponta, a rede elétrica supre a energia elétrica para a carga e para a bateria, nos momentos de carga. A Tabela 11 apresenta o posto tarifário aplicado ao consumidor em 2020 (ENERGIA G. C., s.d.).

Tabela 11: Posto tarifário a que o consumidor pertence.

 [Tarifa Verde](#)

Sub Grupo	TUSD			TE (R\$/MWh)						Ultrapassagem (R\$/KW)		
	R\$ KW	Ponta	Fora Ponta	Ponta			Fora Ponta					
		R\$ MWh	R\$ MWh	Bandeira Verde	Bandeira Amarela	Bandeira Vermelha	TE	Bandeira Verde	Bandeira Amarela		Bandeira Vermelha	
A4 (2,3 a 25 kV)	8,57	566,38	63,65	498,67	498,67	508,67	548,67	313,29	313,29	323,29	363,29	17,14

Fonte: (ENERGIA G. C., s.d.)

- Reserva Energética de Emergência (*backup*): o ESS é utilizado em casos de falha no fornecimento de energia elétrica por parte da rede elétrica. Assim, o ESS garante a qualidade da energia com tempo de resposta rápido, com interrupções de energia imperceptíveis. Para realizar essa função o Sistema de Conversão de Energia (PCS, em inglês Power Conversion System) deve ter a capacidade de atuar no modo ilhado, ou seja, de forma autônoma (GEPEA/USP, 2017). A bateria sustenta a falta de energia de acordo com a carga que possui, por isso deve ser feito estudos de tempo de interrupção na rede para que seja dimensionado um sistema que forneça energia por tempo suficiente, até que a energia seja reestabelecida. Atualmente, essa função também é exercida pelo GMG, porém com tempo de resposta de até 10 segundos, o que deixa a carga momentaneamente sem energia elétrica.

7.7. SUGESTÃO DE TOPOLOGIA DA MALHA MULTI-FONTES

Dentro das informações coletadas e definidas as aplicações direcionadas o sistema de armazenamento foi definido para suprir a carga durante horário de ponta. Analisando a faixa de carga sugerida pelo fabricante em que a bateria deve operar (entre 90% e 20%) deve ser igual à energia medida na ponta que tem valor aproximado de 260kWh, portanto, esse valor representa 70% de carga total da bateria. Para achar os limites de 90%, 20% e o valor nominal de 100% foram feitos cálculos lineares. A Tabela 12 mostra os respectivos valores.

Tabela 12: definição da capacidade de armazenamento de energia da bateria.

Unidade de medida / relativa	(%)	kWh
Energia consumida medida no horário de ponta	70	260
Carga máxima da bateria	90	334,3
Carga mínima da bateria	20	74,3
Carga nominal da bateria (sem perdas)	100	371,4

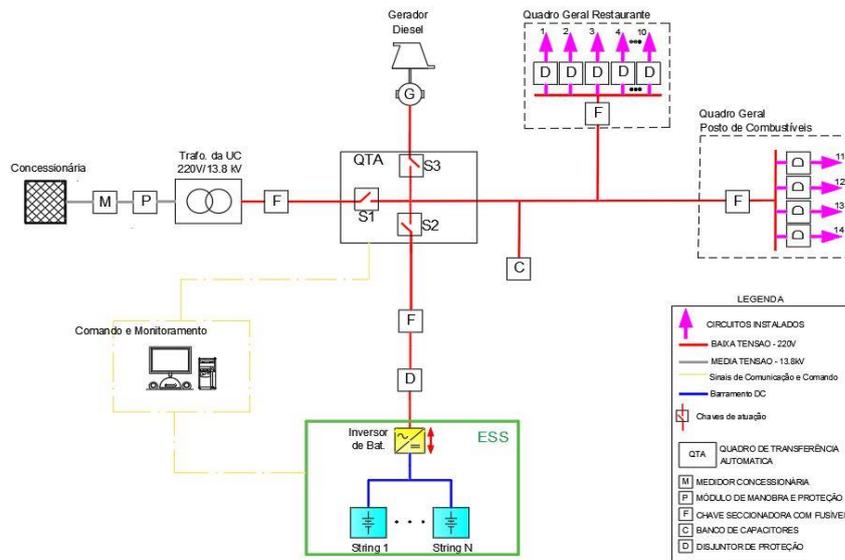
Fonte: Próprio Autor

Ainda é necessário considerar as perdas devido aos sistemas auxiliares, que neste caso são de 15%, conforme informado pelo fabricante do sistema. Portanto a carga nominal, considerando perdas energéticas é de aproximadamente 437kWh, com 371kWh úteis.

Observando agora a potência do sistema, tem-se medido cerca de 130kW em que ainda não considera uma carga de 45kW, pois não foi utilizada (eletroposto). Portanto, a demanda total considerada antes das perdas do próprio sistema de armazenamento é de 175kW. Considerando as perdas de 15%, tem-se uma potência aproximada de 205kW para o sistema de conversão de energia.

Trazendo os valores calculados para referências de produtos comerciais, o sistema selecionado tem capacidade de 430kWh e potência de despacho de 200kW, valores suprem a carga completamente no horário de ponta. Dentro do que foi observado e calculado, para atender às expectativas das aplicações, sugestão de topologia para realizar da malha multi-fontes, conforme Figura 39. É sugerido a conexão do sistema de armazenamento no quadro de transferência automática existente devido à facilidade na alimentação de toda a carga, assim como na conexão com as fontes energéticas.

Figura 39: Topologia sugerida para a malha multi-fontes.



Fonte: Próprio autor

A topologia sugerida na Figura 39, com o armazenamento disponível em um rack de baterias de 390kWh/430kWh e apenas um inversor de 200kW, que converte a energia DC (corrente contínua) diretamente para 220V CA (corrente alternada). O computador, em conjunto com o software de comando e monitoramento, exerce a função de operar, monitorar e permitir acessos remotos ao sistema multi-fontes. A operação ocorre no chaveamento de S1, S2 e S3. Há inversores que podem atuar em paralelo com a rede elétrica e no modo ilhado. Nesta configuração há a opção de se atuar das duas maneiras: modo ilhado com a chave S1 aberta e chave S2 fechada, ou em paralelo com a rede, com chaves S1 e S2 fechadas. No horário de ponta, fica a cargo do operador optar se a bateria será descarregada com a rede em paralelo ou de maneira isolada da rede. A operação do GMG requer necessariamente que as chaves S1 e S2 estejam abertas, portanto, quando faltar energia da rede elétrica e da bateria, essas chaves se abrem e o Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS, em inglês Energy Management System)

emite o comando para a chave S3 fechar. Ao voltar a energia da rede elétrica a chave S3 se abre e as outras se fecham.

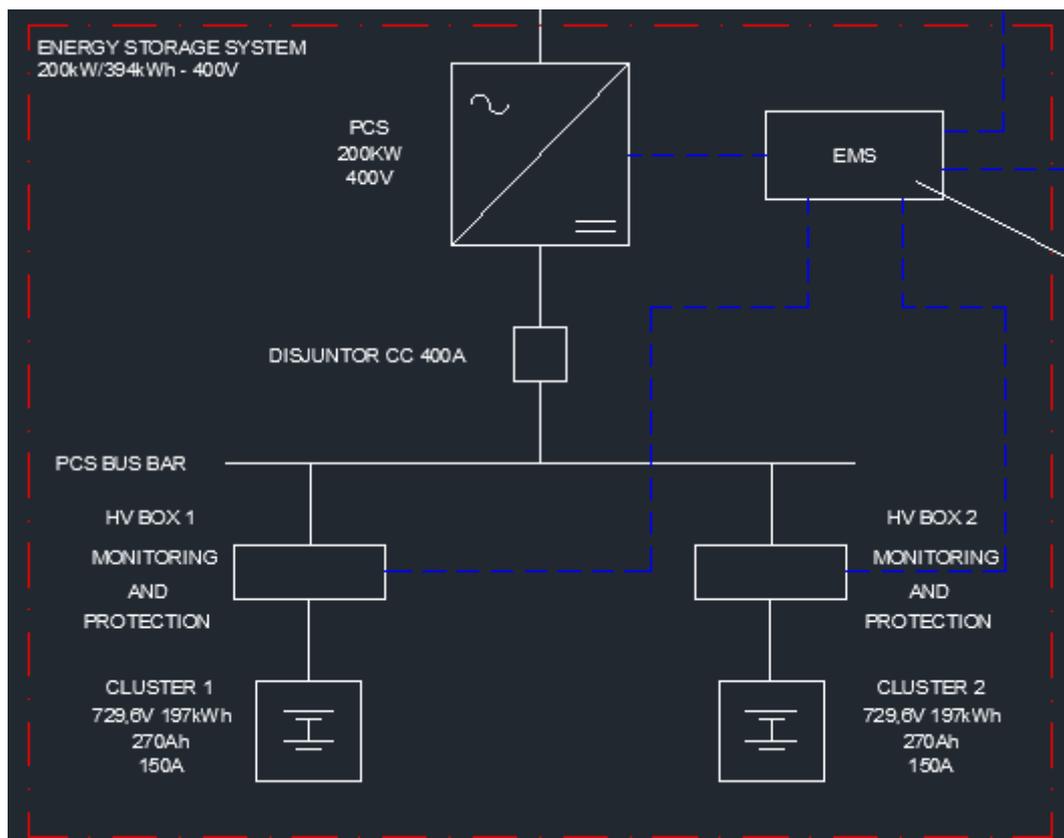
7.8. TOPOLOGIA DO SISTEMA MULTIFONTES INSTALADO

Após a sugestão de topologia elaborada com base no método do capítulo 6 e o resultado exposto na seção 7.7, na seção 7.8 é apresentado a topologia de fato instalada.

7.8.1. HARDWARE DO BANCO DE BATERIAS

O hardware do sistema é composto por um banco de baterias com dois racks principais interligados a um barramento DC, que é conectado ao sistema conversor de energia DC/AC – AC/DC, como mostra a Figura 40. Ainda é possível verificar um disjuntor de proteção entre o barramento DC e o PCS, que tem a função de isolar PCS e banco de baterias em caso de curto circuito a montante do equipamento de proteção.

Figura 40 – Hardware do sistema de armazenamento



Fonte: (ENERGIA C. , PROJETO ELÉTRICO SIMPLIFICADO CPFL PAULISTA - STORAGE GRAAL 200kW/390kWh, Agosto/2020)

A seguir são apresentados os parâmetros observados em (CPQD, Janeiro/2021):

- Células de bateria de íons lítio, tecnologia LFP (Fosfato de ferro-lítio, do inglês “*lithium iron phosphate*”):
 - Tensão nominal da célula: 3,2V;
 - Tensão de cada célula após a recarga: 3,6V;
 - Tensão de cada célula ao final da descarga: 2,8V;
 - Capacidade de armazenamento de energia de cada célula 896Wh;
 - Potência nominal de cada célula: 448W;
 - Tempo de recarga padrão: 2,5h.
- Sistema composto de 2 racks:
 - Tensão nominal de cada rack: 768V;
 - Tensão ao final da recarga: 864V;
 - Tensão ao final da descarga: 672V;
 - Capacidade de armazenamento de energia de cada rack: 208,588kWh;
 - Potência nominal de cada rack: 107,52 kW;
- Sistema de conversão de energia (PCS)
 - Faixa de tensão: 500~850V;
 - Potência máxima CC: 220kW;
 - Potência nominal do sistema: 200kW;
 - Tensão de saída CA: 400VAC;
 - Eficiência máxima 96,1%.
- Parâmetros finais do sistema de armazenamento:
 - Capacidade de armazenamento total (nominal / útil): 430kWh/390kWh;
 - Potência nominal do sistema: 200kW;
 - Tensão de saída (AC): 220/127V;
 - Frequência: 60Hz;
 - Eficiência total (roundtrip): >85%.

O sistema ainda contém um transformador de saída, 400V/220V, 225kVA, interligar o BESS à carga, que opera em baixa tensão, 220V.

7.8.2. SOFTWARES – SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA BATERIA E GERENCIAMENTO DE ENERGIA (BATTERY MANAGEMENT SYSTEM E ENERGY MANAGEMENT SYSTEM)

Dois gerenciadores atuam sobre o sistema de armazenamento de energia, são o sistema de gerenciamento da bateria (“*Battery management system*”), que monitora e controla os parâmetros individuais de cada componente do hardware (tensão nas células, racks, temperatura, etc.) e o sistema de gerenciamento de energia (“*Energy Management system*”), que monitora e controla todos os elementos da rede multifontes, inclusive o banco de baterias.

- Sistema de gerenciamento da bateria (BMS): monitora os níveis de tensão, em (CPQD, Janeiro/2021) são apresentados os parâmetros referência: nominal 3,2V, fim de recarga 3,6V, fim de descarga 2,8V, além de alarme de recarga 3,55V e alarme de descarga 3V. A esses parâmetros de tensão são atrelados os sets points para carga e descarga a fim de preservar a vida útil das células. O BMS também monitora temperatura, corrente das células e demais parâmetros de todo o conjunto (racks), como estado da carga, estado de saúde. A partir disso o EMS pode definir se a bateria está apta para carga ou descarga.
- Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS): Monitora todos os elementos que compõem o sistema multifontes, atuando em chaves e controladores para definir como a malha irá atuar, ou seja, define os despachos. Segundo (CPQD, Janeiro/2021) sistema de armazenamento implementado possui 5 modos de operação:
 - Deslocamento do horário de consumo: O EMS despacha a bateria para suprir a totalidade da demanda energética do consumidor, podendo ser em paralelo com a rede ou não.
 - Energia de emergência: Em caso de falha no fornecimento de energia por parte da concessionária, o EMS despacha a bateria para alimentar a carga durante o período de falta.
 - Regulação de tensão: O sistema de armazenamento de energia pode ser utilizado para controle de tensão do barramento da unidade consumidora, evitando variações bruscas de tensão advindas da rede elétrica da concessionária devido à operação da rede básica de distribuição de energia.
 - Regulação de fator de potência: O EMS controla a bateria de forma a injetar/absorver reativos da carga, mantendo um fator de potência na faixa de 0,92 indutivo/capacitivo.

- Filtro ativo de harmônicos: O EMS atua sobre a bateria para fazer a compensação das componentes harmônicas ao longo do tempo.

Dentro desses modos de operação, são determinados dois principais: deslocamento do horário de consumo e energia de emergência. Esses podem gerar diretamente benefícios econômicos ao consumidor, um substituindo a utilização da energia mais onerosa no horário de ponta ou utilização do gerador a diesel nesse período e outro evitando a falta de energia, que acarreta em perdas econômicas (perda de mercadorias refrigeradas ou aquecidas, além da inoperância do local). Os outros modos de operação estão considerados como secundários.

Nesse contexto, tem-se que a malha multifontes opera como principal fonte a rede elétrica de concessionária, durante o horário de ponta (das 18:00 às 21:00, de segunda a sexta feira, exceto feriados). Durante o horário de ponta o EMS deve despachar somente o BESS, assim o BESS deve estar com energia armazenada para alimentar a carga durante três horas e a descarga deve ocorrer até um estado de carga de 20% de capacidade total, todo esse processo ocorre em paralelo com a concessionária. A partir do momento em que a bateria cai de 20% de energia armazenada, o EMS isola o consumidor da rede elétrica, aciona o gerador a diesel que assume a carga em rampa, até o BESS cessar o fornecimento de energia e se manter fora da malha.

Já no outro modo de operação principal, reserva energética de emergência, o EMS isola toda a malha multifontes da rede básica e solicita que o BESS forneça energia à carga, isso no caso de a bateria ter 20% ou mais de energia armazenada, descarregando-a até esse limite de 20%. No caso de o armazenamento estar abaixo de 20% ou ocorrer de atingir 20% durante a falta de energia da rede, o EMS solicita que o gerador a diesel assuma a carga, sem que a bateria seja recarregada, até a volta da concessionária.

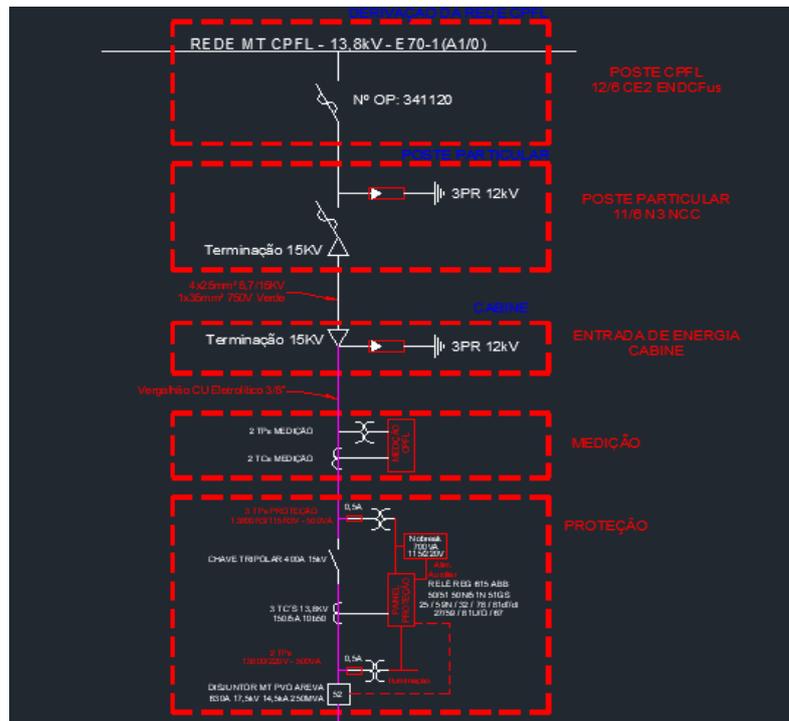
O EMS ainda gerencia o carregamento da bateria nos momentos oportunos, fora do horário de ponta e sem que o armazenamento de energia seja feito através da geração a diesel. Assim, conclui-se que o EMS gerencia o sistema multifontes como um todo, observando os parâmetros da bateria, rede elétrica, carga e gerador a diesel.

7.8.3. Sistema Multifontes

Com a instalação do sistema de armazenamento e implementação do sistema de gerenciamento de energia (EMS) é possível caracterizar a unidade consumidora como uma

malha multifontes, composto por rede elétrica básica, armazenamento de energia, gerador a diesel e carga. Foi necessário também adequações na entrada de energia da rede básica, considerando alteração do relé de proteção, o novo relé digital. A Figura 41 apresenta o ramal de entrada de energia da unidade consumidora para operar como malha multifontes.

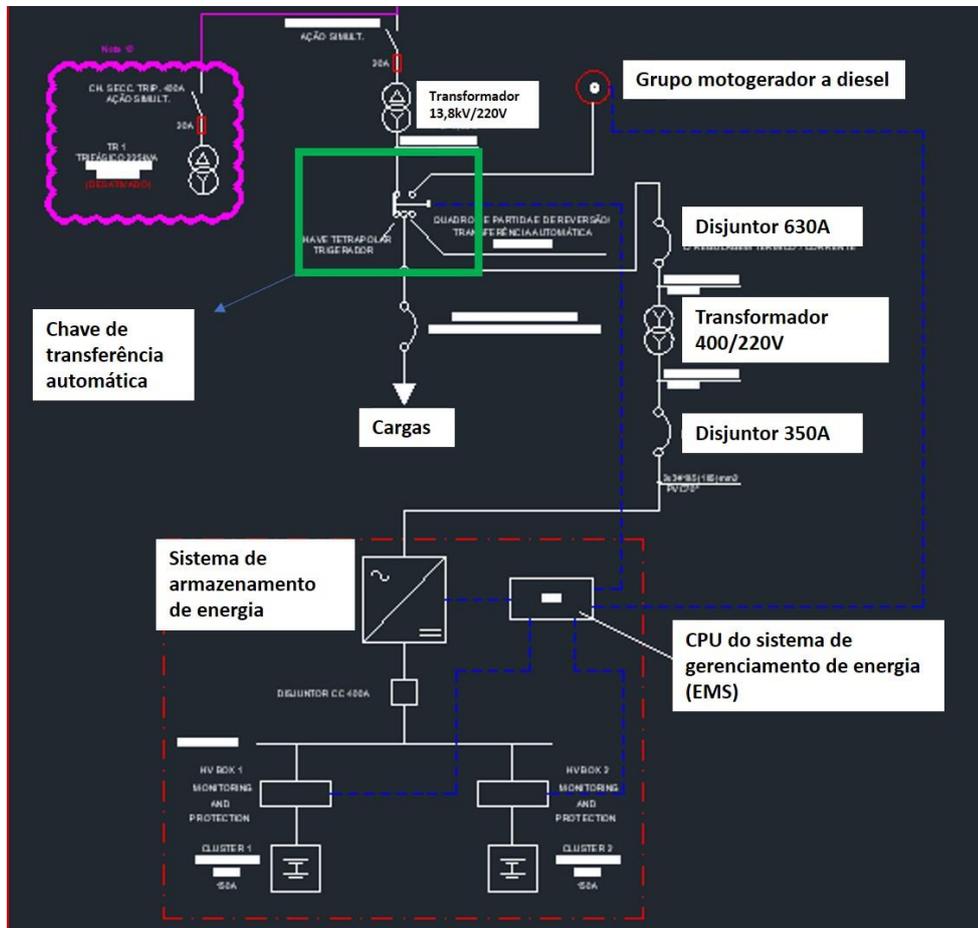
Figura 41 – Ramal de entrada unidade consumidora do consumidor.



Fonte: (ENERGIA C. , PROJETO ELÉTRICO SIMPLIFICADO CPFL PAULISTA - STORAGE GRAAL 200kW/390kWh, Agosto/2020)

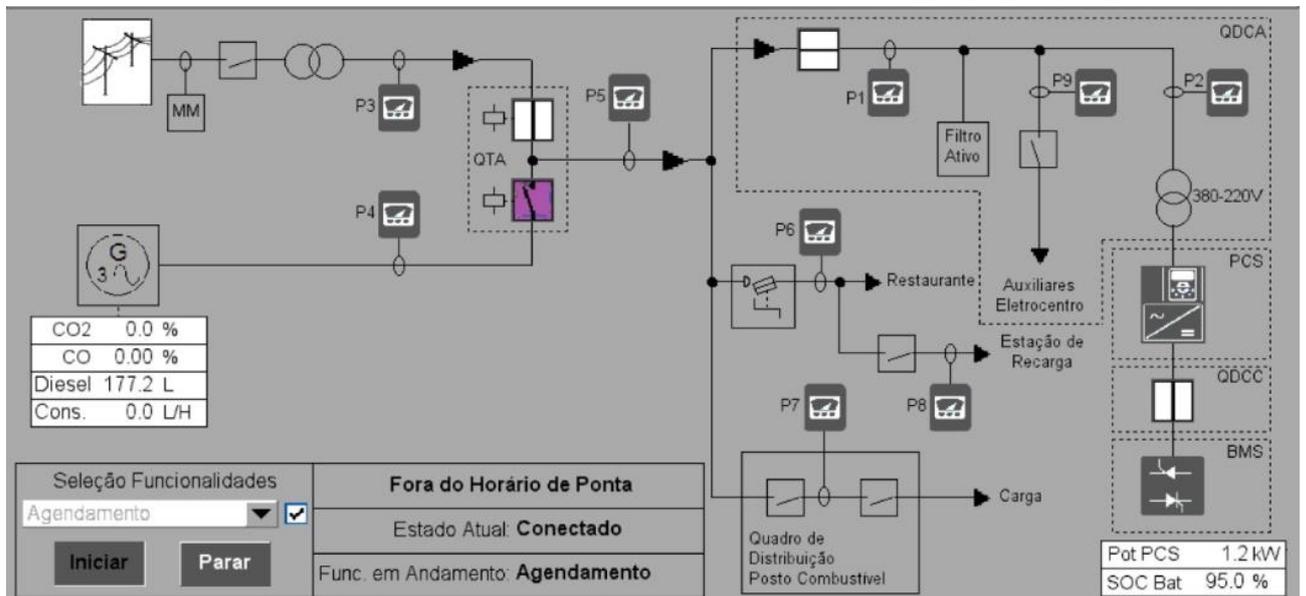
Os componentes presentes no sistema estão descritos nas seções anteriores, gerador a diesel seção 7.3, características da carga seção 7.1 e 7.2 de (GEPEA/USP, 2019) e diagrama geral da instalação antes da implementação do sistema multifontes na seção 7.4 de (GEPEA/USP, 2019). As Figuras 42 e 43 demonstram o resultado final implementado do sistema multifontes.

Figura 42 – Rede multifontes unidade consumidora.



Fonte: (ENERGIA C. , PROJETO ELÉTRICO SIMPLIFICADO CPFL PAULISTA - STORAGE GRAAL 200kW/390kWh, Agosto/2020)

Figura 43 – Tela do sistema de gerenciamento de energia (EMS).



Fonte: (CPQD, Janeiro/2021)

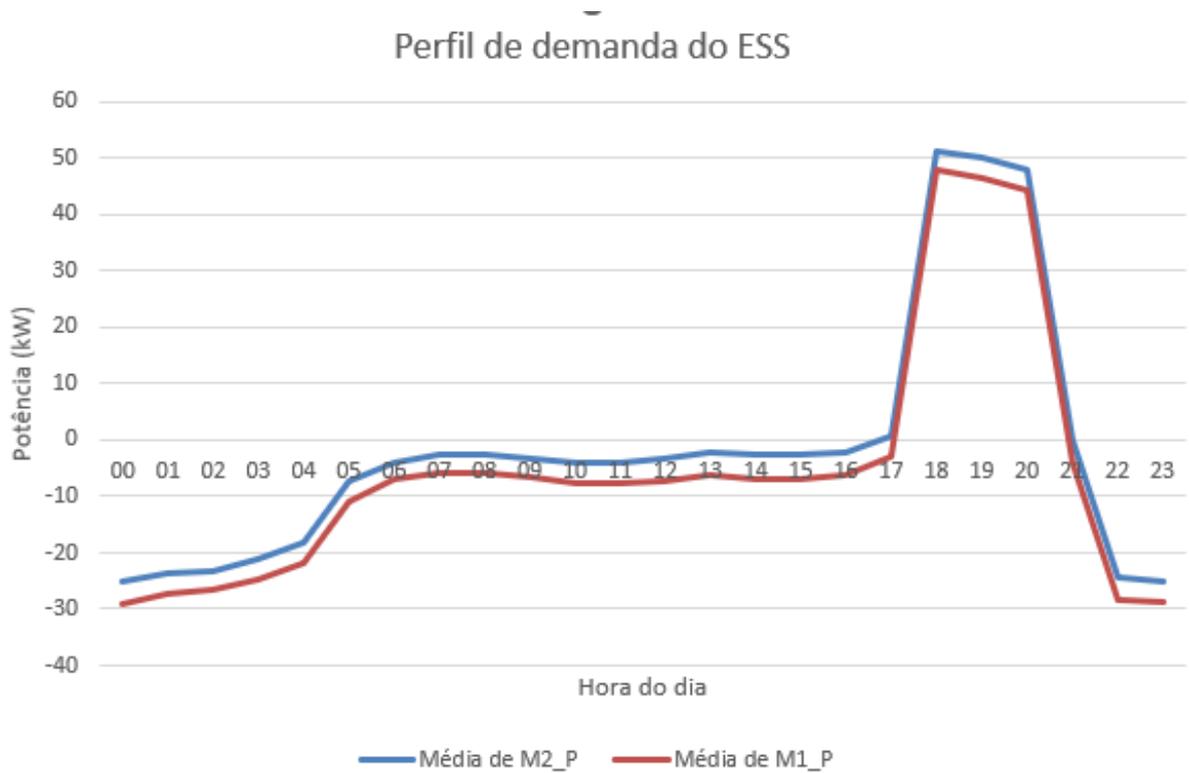
Na figura 43 observa-se os multimedidores de energia instalados de P1 a P9, foram instalados em pontos estratégicos para verificar o fluxo de potência, perdas, níveis de tensão, corrente, etc., ainda existe um sensor de CO₂/CO instalado na saída de gases de escape do gerador a diesel, assim como sensor de nível e consumo de combustível para monitorar as emissões desses gases.

É possível verificar também os auxiliares eletrônicos, que correspondem basicamente ao sistema de climatização do container em que o banco de baterias está instalado e alimentação de controladores e eletrônicos utilizados para o monitoramento e controle de toda a malha multifontes. Os dados mostrados na próxima seção mostram o comportamento energético do consumidor, resultados da incorporação da bateria do lado do consumidor.

7.8.4. Resultados Após a Instalação

Foram coletados dados dos medidores no período entre 01/04/2021 e 05/05/2021, a Figura 44 mostra o perfil hora a hora da demanda do sistema de armazenamento, baseado na média dos valores obtidos. É visto em azul os dados coletados pelo medidor P2, logo na saída do conversor AC/DC da bateria e, em laranja, os dados do medidor P1, que é a parcela que vai para a carga ou absorvida pelo sistema.

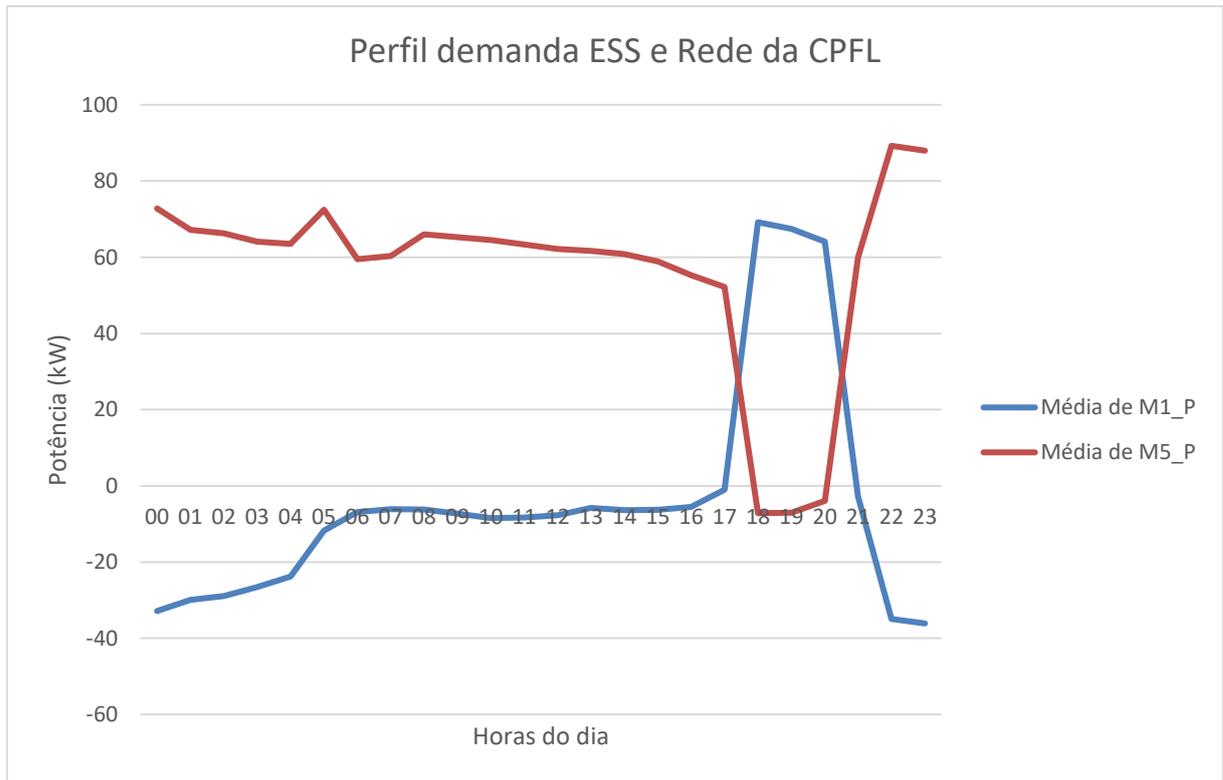
Figura 44 – Perfil de demanda do ESS.



É verificado uma diferença entre os dados devido às perdas associadas as cargas auxiliares (ar condicionado, sistemas eletrônicos, etc) e um consumo baixo durante o dia pelo mesmo motivo. Já no período após o horário de pico (das 21:00 até às 5:00) ocorre o carregamento da bateria.

Já na Figura 45 é mostrado o comportamento da potência fornecida pela rede e o perfil do sistema de armazenamento, desconsiderando sábados, domingos e feriados os quais não possuem horário de ponta e diferenciação tarifária.

Figura 45 – Perfil de demanda do ESS.

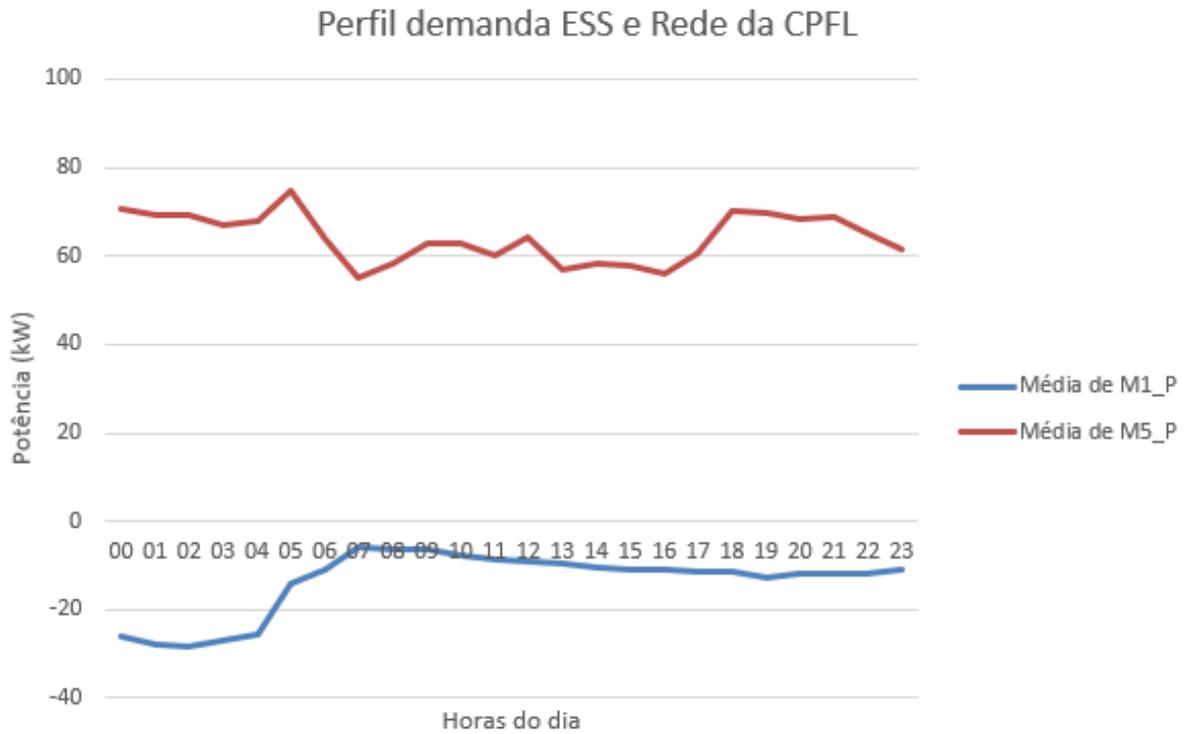


Fonte: próprio autor

Verifica-se que ao passo que a bateria assume a demanda, a rede deixa de suprir a carga. Ocorre o deslocamento da demanda do horário de pico. Por se tratar de um cliente na modalidade tarifária verde, grupo A4, o custo com a TUSD e TE neste horário diminui. Caso fosse um cliente na modalidade tarifária azul, seria possível contratar um valor menor de demanda na ponta, decrescendo o custo com demanda e TE.

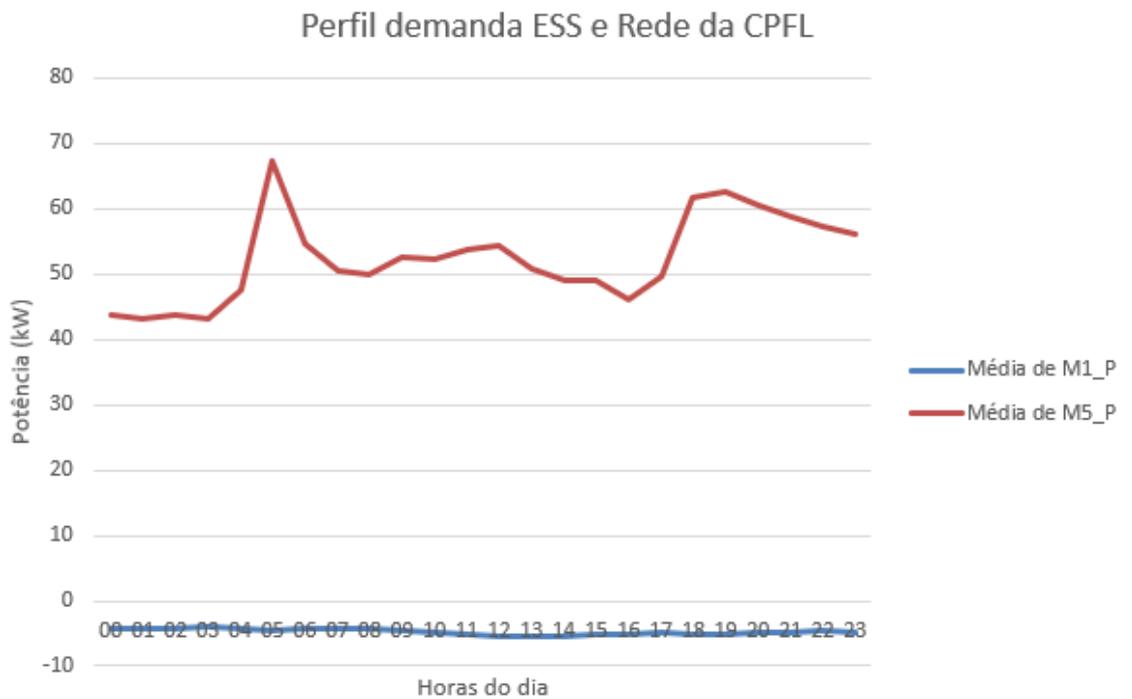
As Figuras 46 e 47 apresentam as curvas de carga de sábados e domingos, respectivamente.

Figura 46 – Perfil de demanda do ESS aos sábados.



Fonte: próprio autor

Figura 47 – Perfil de demanda do ESS aos domingos

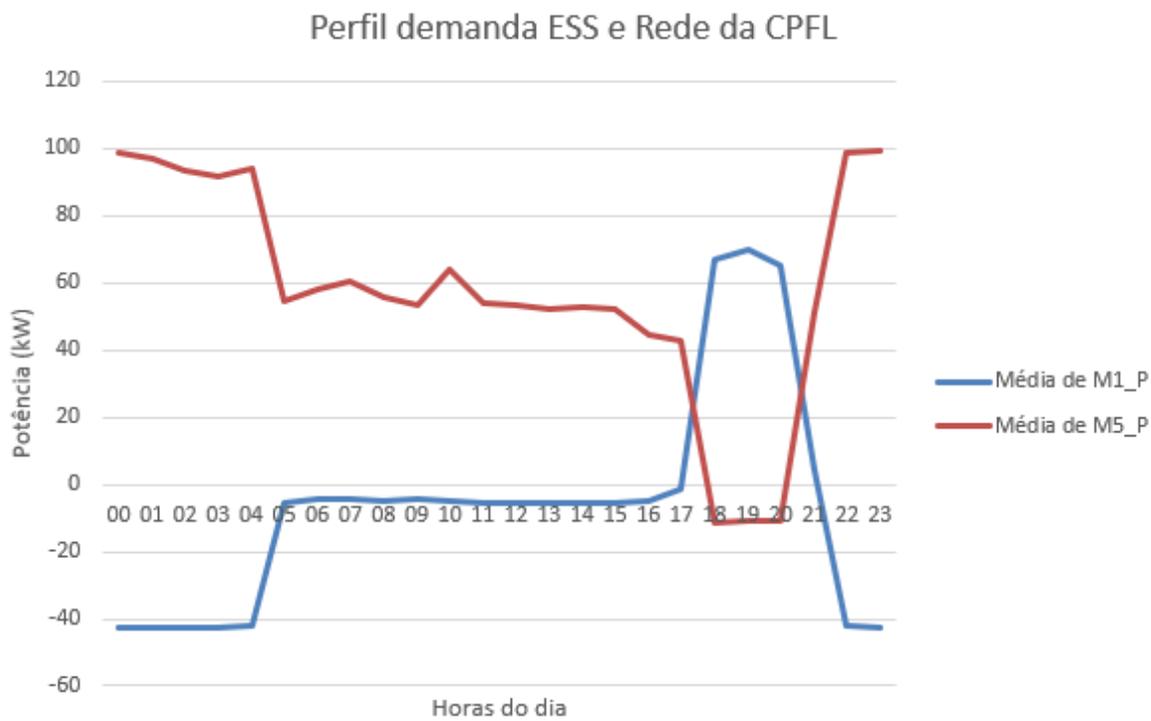


Fonte: próprio autor

Observa-se que nos sábados durante a madrugada, a bateria ainda está carregando e durante o dia, aos finais de semana, a bateria não descarrega, conforme estratégia de despacho.

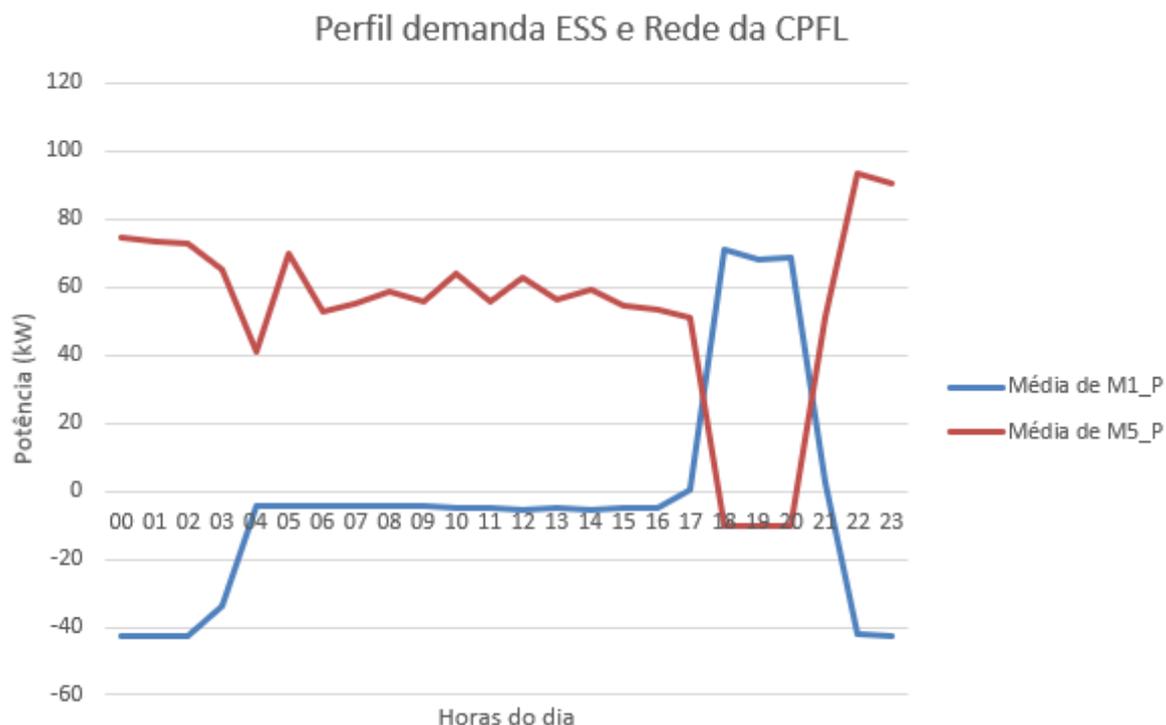
Durante o período de dados coletados, ocorreram dois feriados durante dias de semana, os dias 02/04/2021 (sexta-feira) e 21/04/2021 (quarta-feira). As curvas de demanda desses dias estão representadas nas Figuras 48 e 49.

Figura 48 – Perfil de demanda do ESS feriado dia 02/04/2021.



Fonte: próprio autor

Figura 49 – Perfil de demanda do ESS feriado dia 21/04/2021.

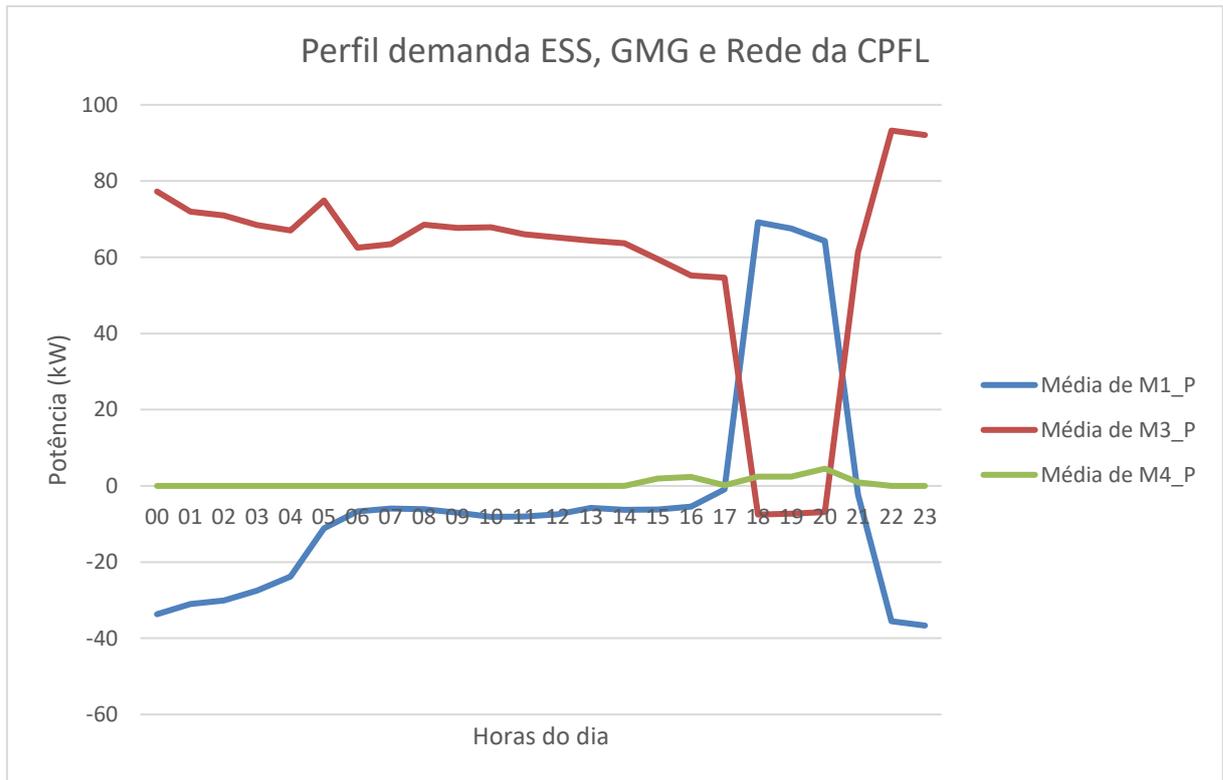


Fonte: próprio autor

Percebe-se que nestes dois dias de feriado durante a semana ocorreu o despacho da bateria nos horários de ponta, porém, em feriados não existe diferenciação tarifária entre horário de ponta e fora de ponta. Portanto, é necessário fazer ajuste no software para que não ocorra o despacho da bateria no horário de ponta de feriados de dia de semana, caso contrário, a bateria irá descarregar em um momento em que a tarifa é o mesmo custo da tarifa em que ocorreu o carregamento. Com as perdas que existem, pode-se dizer que o cliente tem prejuízo neste tipo de situação.

Dentro do período analisado, pode-se concluir que o gerador a diesel operou poucas vezes, conforme Figura 50, em verde a potência média desenvolvida pelo gerador durante todo o período.

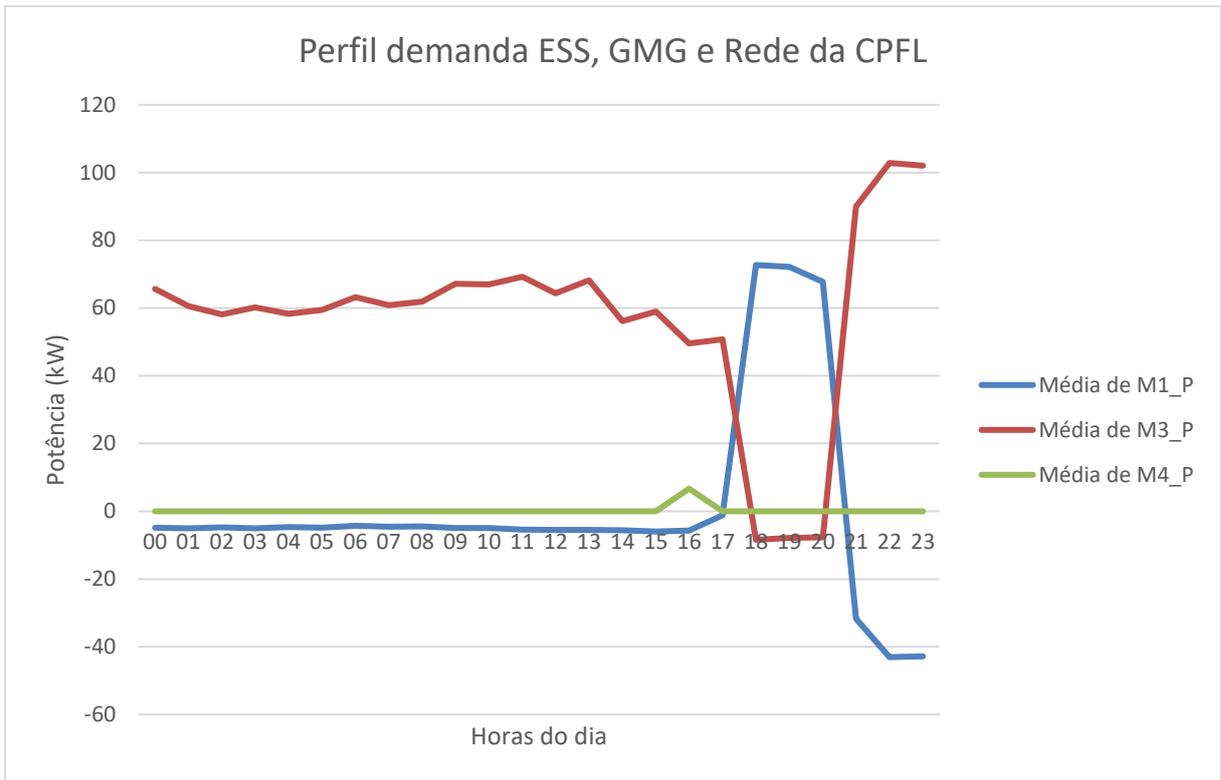
Figura 50 – Perfil de demanda do ESS , rede e GMG.



Fonte: próprio autor

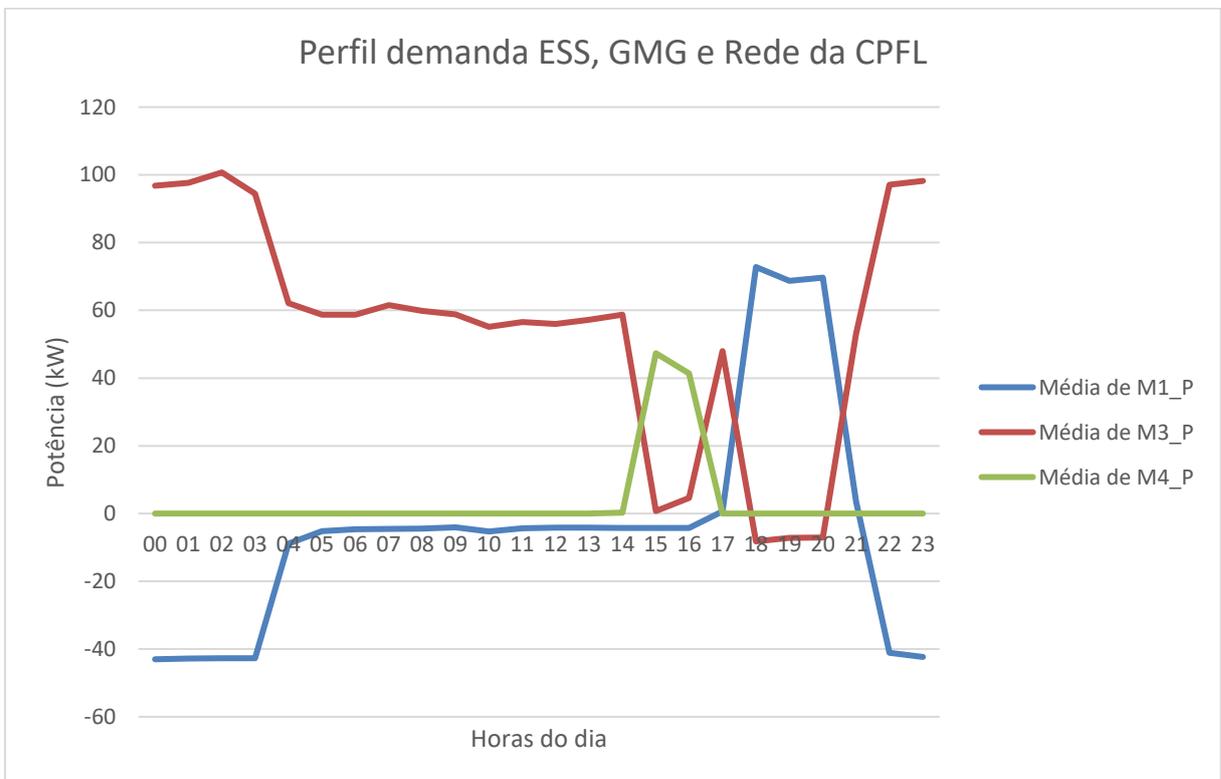
Aprofundado a análise, é verificado que o gerador a diesel (GMG) foi acionado nos dias 05/04/2021, 06/04/2021, 26/04/2021, 04/05/2021 e 05/05/2021. As Figuras 51, 52, 53, 54 e 55 trazem o perfil da demanda dos elementos da malha multifontes nesses dias.

Figura 51 – Perfil de demanda do ESS , rede e GMG em 05/04/2021.



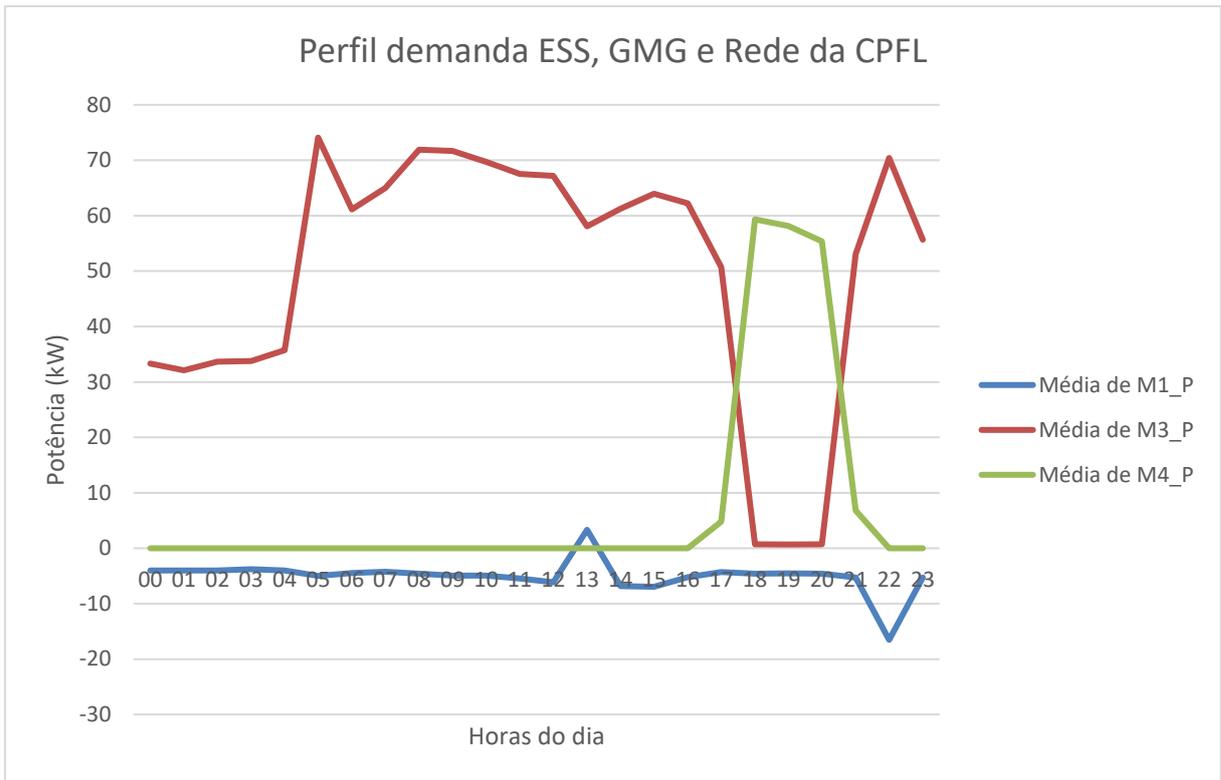
Fonte: próprio autor

Figura 52 – Perfil de demanda do ESS , rede e GMG em 06/04/2021.



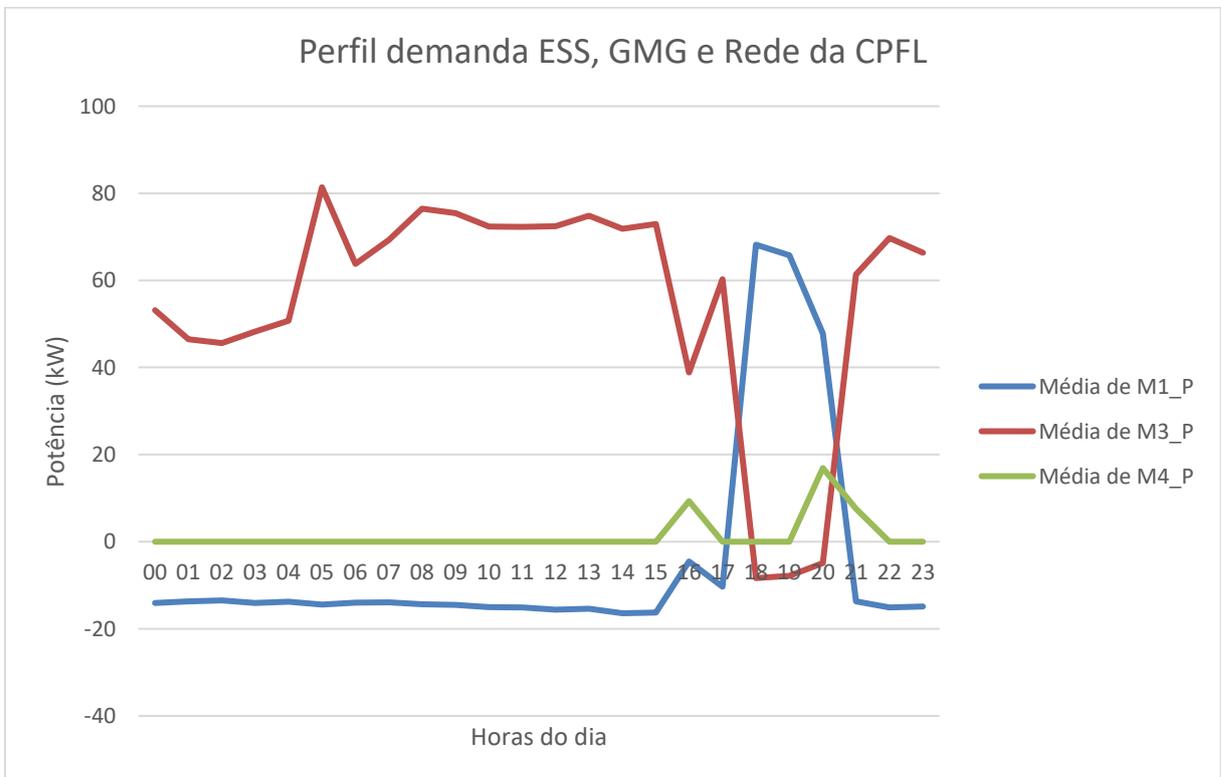
Fonte: próprio autor

Figura 53 – Perfil de demanda do ESS , rede e GMG em 26/04/2021.



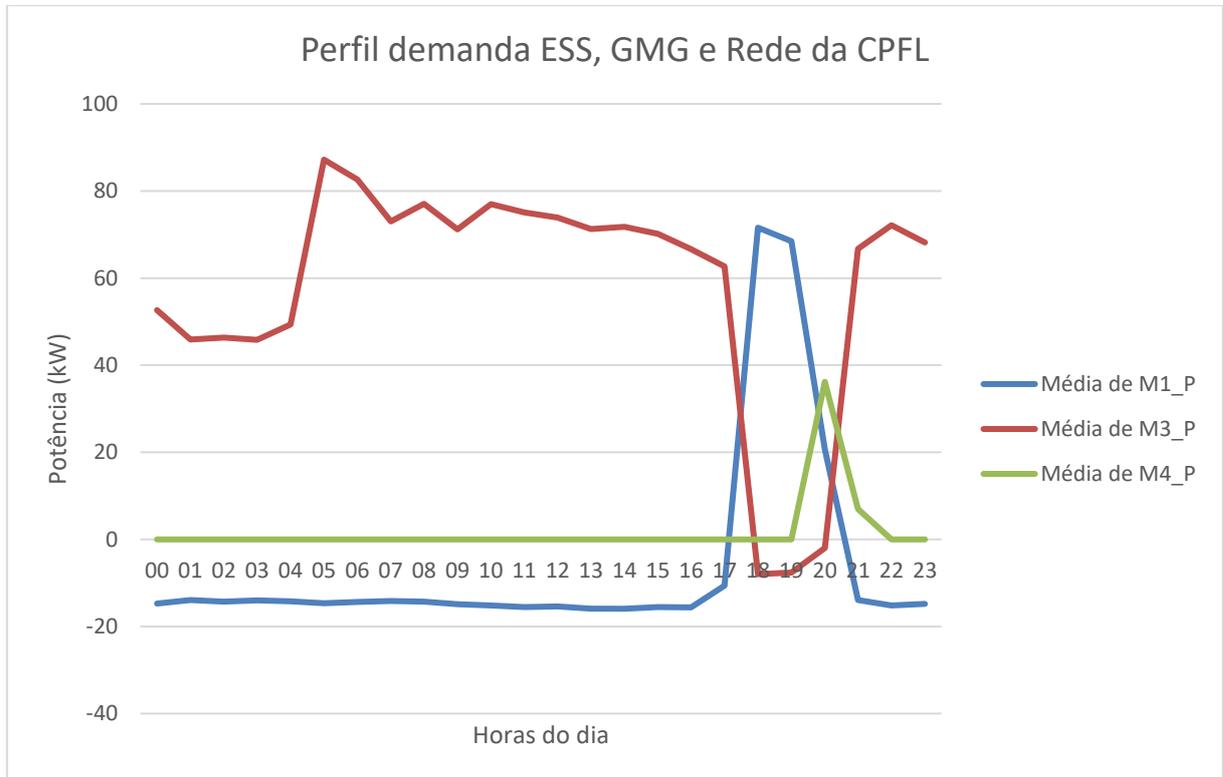
Fonte: próprio autor

Figura 54 – Perfil de demanda do ESS , rede e GMG em 04/05/2021.



Fonte: próprio autor

Figura 55 – Perfil de demanda do ESS , rede e GMG em 05/05/2021.



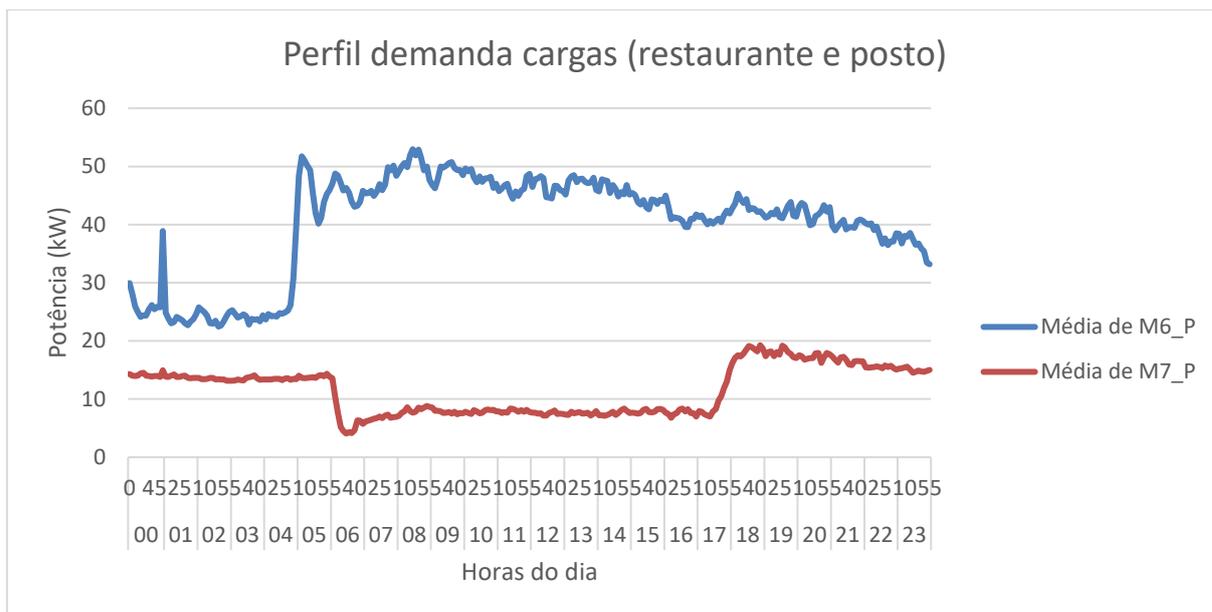
Fonte: próprio autor

Esses dias em que o gerador operou tem características de testes no sistema, para verificar como a microrrede se comporta. No dia 05/04/2021 operou por 15 minutos, logo antes do horário de pico, a bateria assumiu logo toda a carga. Já no dia 06/04/2021 o GMG funcionou por cerca de duas horas (das 14:00 às 16:00), a rede assumiu a carga às 16:00 e a bateria iniciou a descarga às 17:00, apesar de estar carregada, não foi prioridade na linha de comando, o que contradiz a lógica de controle. O que pode indicar um teste de falha na rede com acionamento do gerador para suprir a carga, simulando bateria descarregada. A bateria assume a carga no horário de pico, e não a rede. Em 26/04/2021, a bateria tem uma descarga leve entre 12:00 e 14:00 e o gerador assume a carga no horário de pico, simulando que a bateria estaria totalmente descarregada no horário de pico, assim o gerador assume a carga. Após às 21:00 a rede retorna e carrega a bateria levemente. Em 05/05/2021 demonstra a bateria iniciando sua descarga uma hora antes do que foi definido na programação, às 17:00, operando até às 21:00, porém o gerador a diesel entra no circuito para apoiar a bateria no fornecimento de energia, funcionando em paralelo com a rede entre 21:00 e 22:00.

Nota-se que dos dias analisados no detalhe, apenas dia 26/04/2021 não ocorreu fluxo de potência da carga para a fonte, negativo, levando a conclusão de que o local operou de forma isolada da rede básica de eletricidade.

Observando os medidores que monitoram as cargas, não se vê grandes variações ou flutuações dependentes da fonte de fornecimento de energia. A Figura 56 mostra os dados para as cargas, em laranja do posto de combustíveis e em azul para o restaurante.

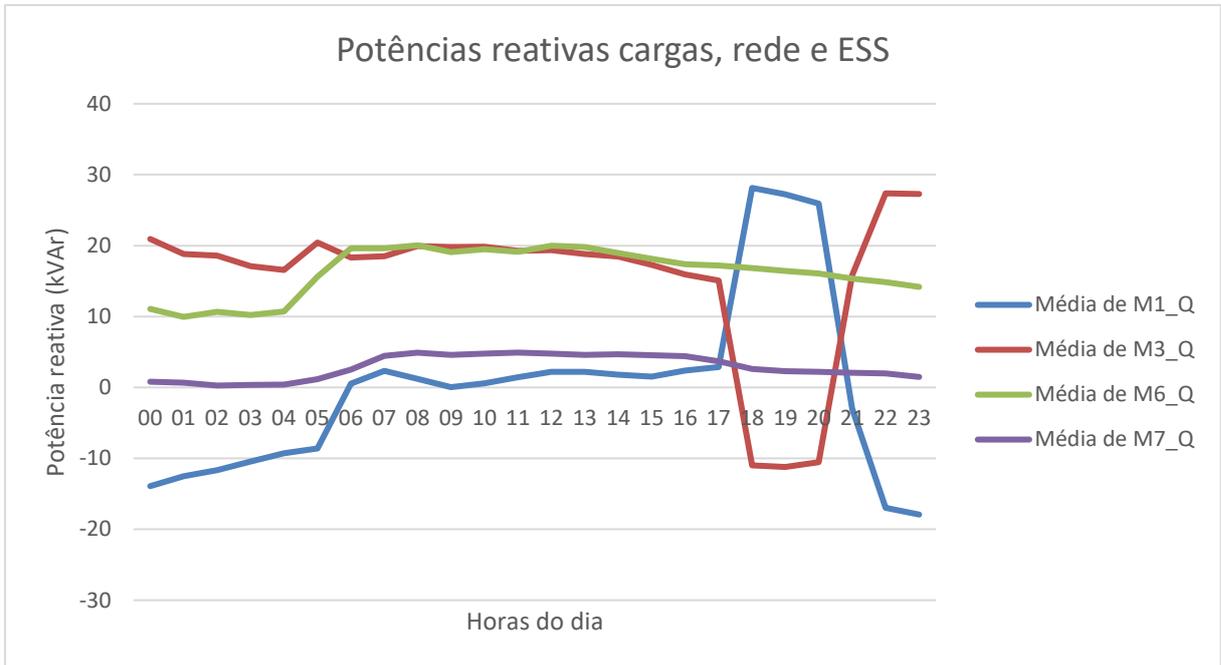
Figura 56 – Perfil de demanda das cargas, média minuto a minuto.



Fonte: próprio autor

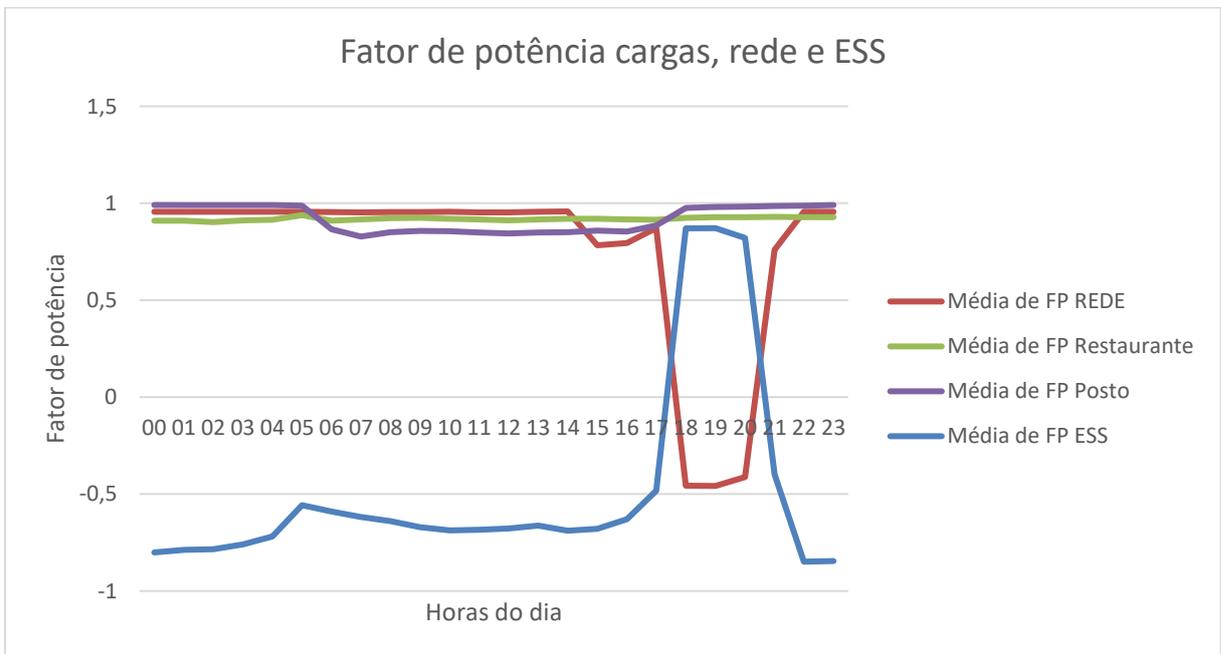
As Figuras 57 e 58 apresentam respectivamente o perfil da potência reativa e do fator de potência das cargas, ESS e rede. Durante o horário de pico o ESS assume todo o fornecimento de energia reativa para manter o fator de potência das cargas em torno de 0,92 indutivo. Neste momento, o medidor conectado na entrada do circuito (rede) “enxerga” um fator de potência capacitivo em torno de 0,45, o que para este horário não causa penalidades. Mas caso a bateria seja descarregada entre 23:30 e 6:30, segundo (ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2021) o consumidor fica exposto a penalidades com fator de potência capacitivo abaixo de 0,92.

Figura 57 – Perfil de potências reativas para cargas (posto em roxo, restaurante em verde), rede (em vermelho) e ESS (em azul).



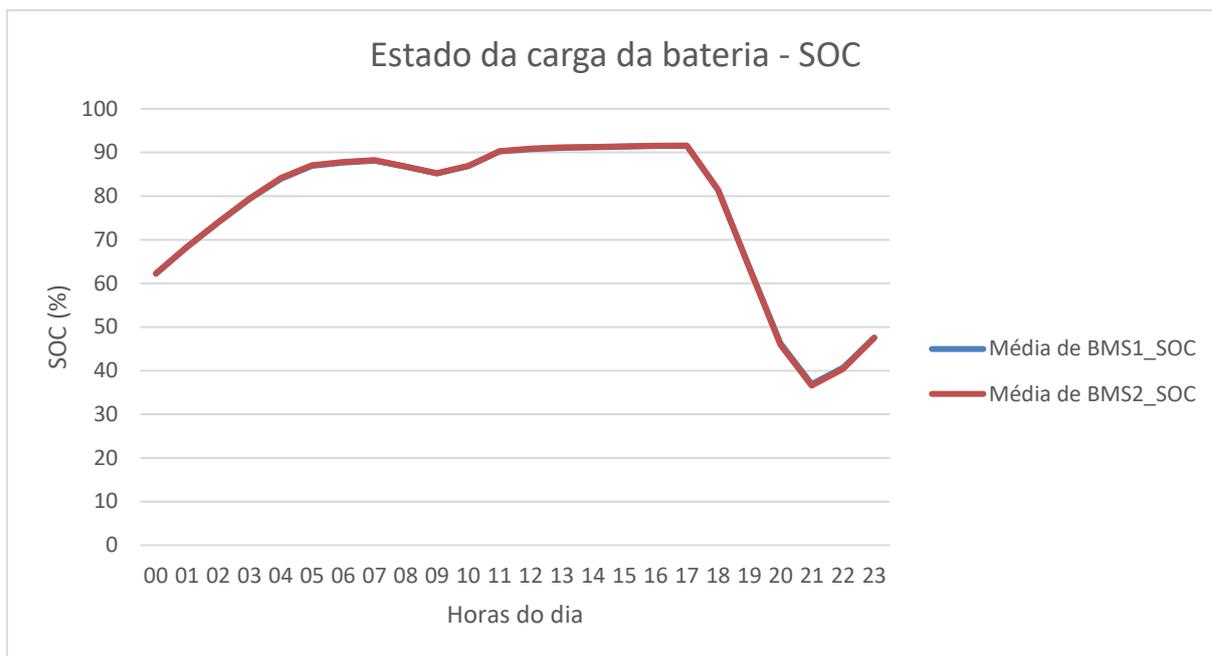
Fonte: próprio autor

Figura 58 – Fator de potência, média horária, (posto em roxo, restaurante em verde), rede (em vermelho) e ESS (em azul).



Fonte: próprio autor

Figura 59 – Estado da carga da bateria, Rack 1 em azul, rack 2 em vermelho.



Fonte: próprio autor

Na análise de dados faltaram informações em 26/04/2021 entre 16:15 e 16:20 e nos dias 02/05/2021 e 03/05/2021. Ainda foram obtidos outros dados de temperatura, porcentagem de CO e CO₂ nos gases exaustos do gerador, nível do tanque de diesel, etc.

7.8.5. Considerações

Analisando a topologia proposta no item 7.7 verifica-se diversas semelhanças com a instalação descrita no item 7.8, a ideia instalada foi melhorada e atualizada conforme o melhor custo. Considerou-se um barramento “CA” em que se conectam rede elétrica, gerador a diesel, bateria e cargas, conforme Figura 41, enquanto que o sugerido no item 7.7 é que toda essa conexão seja feita em apenas um painel. Outra diferença foi o PCS, que como mostra a Figura 43 idealmente tem a tensão de saída de 220V e se interliga ao barramento diretamente para despacho às cargas. Na arquitetura instalada, foi considerado um PCS de tensão de saída 380~400V, utilizando-se um transformador rebaixador 400V/220V para atender à tensão de operação da carga. As discrepâncias entre o sugerido e o instalado ocorreram devido à disponibilidade padrão comercializado pelo mercado, em busca do menor número de intervenções e o menor custo. No procedimento sugerido, não constavam algumas proteções necessárias, que foram verificadas durante o processo de instalação.

Observando os parâmetros de capacidade de energia armazenada total (nominal - útil de 430kWh/390kWh) e observando os valores de consumo apresentados na seção 7.2, verifica-se que a bateria atende com segurança o fornecimento energético da carga em um dia em que ocorra um período de falta energética e atuação no horário de ponta, mantendo o limite de descarga de 80% da carga total, afim de preservar a vida útil das células de armazenamento, isso foi verificado ao analisar o SOC da bateria, conforme Figura 59. Mesmo que o estado de carga chegue a valores menores que 20%, o EMS atua para ativar o gerador a diesel, mantendo o fornecimento de energia elétrica à unidade consumidora. Assim, é possível afirmar que a malha multifontes apresenta-se como uma solução energética tecnicamente viável para suprir demandas energéticas de consumidores.

8. CONCLUSÕES

O estudo buscou o entendimento dos conceitos básicos sobre sistemas multifontes com armazenamento de energia, visando estabelecer os parâmetros iniciais para apresentar e um procedimento que tem a intenção de expor um novo tipo de solução energética para consumidores conectados à rede de distribuição.

Para isso foi feito levantamento bibliográfico de instalações ao redor do mundo, com foco no armazenamento de energia em baterias. É importante verificar que existem diversas tecnologias disponíveis no mercado, porém a escolha do tipo de bateria não é um fator limitante para a solução, basta que as características atendam às funções exigidas para cada aplicação. Sendo assim, a análise correta para a escolha da bateria deve levar em consideração parâmetros de capacidade de armazenamento, número de ciclos carga/descarga, espaço físico, temperatura ambiente, aplicação desejada, tempo de carga/descarga, potência exigida pela carga ao longo do dia e demais especificidades de cada caso.

Para difundir esse tipo de estratégia como uma solução energética, é fundamental abrir mercado, inicialmente identificando que um sistema multifontes pode gerar benefícios para os clientes, como aumento de produção ou diminuição do custo com eletricidade. Nas indústrias citadas na seção 5.2, a introdução de um sistema de armazenamento se encaixa, pois gera benefícios na produção e nos custos energéticos, além de ter a possibilidade de um melhor aproveitamento da fonte solar fotovoltaica.

Identificado empiricamente com visitas em indústrias e em estudos bibliográficos a existência de abertura técnica para inclusão de sistemas de armazenamento, criando uma microrrede, pode ser explorado um novo mercado para este tipo de solução e para difusão desse

tipo de visão energética, a seção 6 traz um procedimento básico que pode guiar indústrias e grandes comércios a introduzirem essa solução, tornando-se menos expostos às variações que ocorrem no mercado de energia, regulado ou livre.

Dentro da pesquisa, a fim de verificar a validade do sistema multifontes como uma solução de mercado, acompanhou-se o projeto estratégico de P&D 00063-3025/2016 em que foi instalado um sistema de armazenamento em um cliente do tipo comercial do grupo A4, conectado em média tensão. Foi utilizado método da seção 6 para dimensionar a capacidade, potência, estratégias de despacho e topologia do sistema piloto. No início o objetivo é compreender a o perfil de operação do cliente, onde já existia a operação de um gerador a diesel no horário de ponta, evitando maiores custos neste momento. É possível verificar que a carga tem um comportamento estável ao longo do dia, com poucas ou quase nenhuma interrupção da rede básica como é visto nas medições apresentadas nas Figuras 28 a 36. Com essas informações, foi dimensionado o sistema de armazenamento, a topologia de conexão e as estratégias de operação. Da forma como ficou a instalação, uma das diferenças foi a utilização de um autotransformador para adequação do nível de tensão do conversor DC/AC de tensão, porém, de forma geral as características da Figura 40 foram semelhantes às da Figura 44. A topologia foi pensada de forma que a bateria alimente todas as cargas e existe a possibilidade de diversas manobras, com operação em paralelo com a rede ou ilhado, com o gerador a diesel operando ou não e etc.. Caso o local operasse com um sistema solar fotovoltaico, poderia ser criado um barramento DC entre sistema solar e bateria, para carregamento em DC ou mesmo em AC, dependendo da localização dos recursos.

Nas análises após a implementação do sistema de armazenamento, seção 7.8.4, é possível verificar como se comporta a malha multifontes. A bateria assume a carga nos horários de ponta, de forma que o gerador fica em modo de emergência (*backup*). Pode ser que ainda existam melhorias a serem feitas no software de controle (EMS), para evitar exportação da energia da bateria para a rede, mantendo uma quantidade maior de energia na bateria ao final do horário de pico, isso pode elevar a vida útil da bateria, já que diminui o tempo de carga da bateria, e são necessárias menos cargas elétricas para armazenar energia. Ou então pode ser que despachar toda a energia da bateria seja uma estratégia para se obter maiores ganhos econômicos. Outro ponto observado é o despacho da bateria em feriados durante a semana, que não apresenta vantagem nenhuma ao cliente.

Quanto a níveis de SOC (*state of charge*), não foram muitos períodos em que o estado da carga ficou abaixo de 20% ou acima de 90%. Na média, o estado da carga se mantém entre

90% e 35%, conforme a Figura 60, nesses parâmetros preserva-se a vida útil da bateria e demonstra bom dimensionamento do sistema.

Portanto, o sistema instalado se mostrara semelhante ao que foi previsto, tanto na elaboração da topologia quanto no fluxo de potência desejado. Assim, a solução se mostrou confiável e apta, do ponto de vista técnico, para ser difundida no mercado Brasileiro. Além do benefício para o consumidor que evita a utilização da rede elétrica no período mais caro, ocorre o alívio do sistema de distribuição no momento em que a bateria está atuando, pois, é uma carga a menos para o sistema, na média de valores próximos a 80kW. Outro benefício observado é a redução nas emissões de CO₂/CO e SO₂, que ocorre com o menor uso do gerador a diesel, contribuindo com os objetivos de redução do aquecimento global firmados no acordo de Paris, na COP21.

Para influenciar os consumidores a obterem este tipo de solução, ainda é necessário melhorias na regulação para recursos de armazenamento de energia distribuídos, por exemplo remuneração para consumidores que tenham este tipo de sistema e realizem serviços ancilares, resposta a demanda. Um ponto que pode ser explorado é a criação de programas para financiar este tipo de solução, acoplando fontes renováveis, para contribuir com as metas de redução de gases de efeito estufa. A partir do momento que a solução for difundida, o custo pode cair devido a economia de escala para estes produtos.

Ao final, conclui-se que os sistemas multifontes com armazenamento de energia é um dos caminhos para a transição energética, auxilia no aproveitamento dos excedentes de geração distribuídos, melhora o desempenho produtivo com menores custos energéticos, além de contribuir com o sistema elétrico mesmo se localizando do lado da demanda. É uma possível solução energética para indústrias e grandes comércios aumentarem sua competitividade.

Este trabalho pode abrir caminho para difusão de instalações inteligentes, com diversos recursos energéticos que podem operar em conjunto para minimizar custo, impacto ambiental e aumentar a produtividade. Desenvolver a regulação e promover a facilidade de financiamento para sistemas multifontes são estratégias que ficam para estudos futuros.

9. REFERÊNCIAS

- Alves, V. T., PASA, V., & Cecchetti, R. K. (03 a 05 de dezembro de 2014). Processo produtivo da Indústria de Plásticos: um estudo à luz do. *V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*.
- Agência Nacional do Petróleo, G. N. (s.d.). *Levantamento de Preços e de Margens de Comercialização de Combustíveis*. (ANP) Acesso em 24 de 03 de 2019, disponível em https://preco.anp.gov.br/include/Resumo_Por_Municipio_Posto.asp
- ANEEL. (2017). *Espaço Empreendedor*. (ANEEL) Acesso em 28 de Abril de 2017, disponível em Agência Nacional de Energia Elétrica: <http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=57&idPerfil=5>
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (2010). REN 414, Resolução Normativa 414. Brasília.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (7 de Dezembro de 2021). Resolução Normativa ANEEL nº1000, REN 1000. *REN 1000*. Brasília.
- Banguero, E., Correcher, A., Pérez-Navarro, Á., Morant, F., & Aristizabal, A. (18 de Abril de 2018). A Review on Battery Charging and Discharging Control Strategies: Application to Renewable Energy Systems. *MDPI*, 15.
- Baxter, R., & Byrne, R. (2020). ENERGY STORAGE SYSTEM PRICING. Em U. D. (DOE), *U.S. DOE Energy Storage Handbook* (p. capítulo 25).
- Berkeley Lab. (s.d.). *About Microgrids*. Acesso em 20 de Março de 2018, disponível em Berkeley Lab: <https://www.energystorage.lbl.gov/>
- Bet, I. (s.d.). Acesso em 2019, disponível em <http://www.iee.usp.br/sites/default/files/9-SEAAEIFR%20-%20V1.pdf>
- Carter, D., Zoellick, J., Marshall, M., Chapman, G., Lehman, P., Saucedo, D., . . . Singh, P. (2019). *Demonstrating a Secure, Reliable, Low-Carbon Community Microgrid at the Blue Lake Rancheria*. California, EUA: California Energy Commission.
- Chevron Energy Solutions Company. (2014). *CERTS MICROGRID DEMONSTRATION WITH LARGE SCALE ENERGY STORAGE AND RENEWABLES AT SANTA RITA JAIL*.
- CHOWDHURY, S., & CROSSLEY, P. (2009). *Microgrids and Active Distribution Networks*. Institution of Engineering and Technology.
- CPQD, C. d. (Janeiro/2021). *Comissionamento de Banco de Baterias Conectado à Rede Elétrica de Distribuição*.

- ENERGIA, C. (16/02/2017). *GED 33, Ligação de Autoprodutores em Paralelo com o Sistema Distribuição CPFL*.
- ENERGIA, C. (Agosto/2020). *PROJETO ELÉTRICO SIMPLIFICADO CPFL PAULISTA - STORAGE GRAAL 200kW/390kWh*.
- ENERGIA, G. C. (s.d.). *CPFL EMPRESAS, Tarifas CPFL Piratininga*. (GRUPO CPFL ENERGIA) Acesso em 24 de Março de 2019, disponível em <https://www.cpflempresas.com.br/institucional/tarifas.aspx?emp=PIRA>
- Energy Storage World Forum. (2014). *Energy Storage World Markets Report*. Berlin: Azure International.
- EPE. (2012). *Perguntas Frequentes*. (Ministério de Minas e Energia) Acesso em 02 de Maio de 2017, disponível em Empresa de Pesquisa Energética: <http://www.epe.gov.br/acessoainformacao/Paginas/perguntasfrequent.es.aspx>
- EPE. (2015). *Balanco Energético Nacional 2016*. Brasília : EPE .
- EPE. (2017). *Estudos para a Expansão da Transmissão - N° EPE-DEE-RE-009/2017-rev0*. Brasília: EPE.
- ESWF. (2014). *Energy Storage World Markets Report 2014-2020*. Energy Storage World Forum.
- ESWF. (2018). *Growing the Battery Storage Market 2018: Exploring Four Key Issues*. Energy Storage World Forum.
- ESWF. (s.d.). *Energy Storage World Forum*. Acesso em 3 de Abril de 2018, disponível em Energy Storage World Forum: <https://energystorageforum.com/energy-storage-technologies/applications-of-energy-storage>
- Fontana, E. P. (Dezembro 2018). *Relatório Técnico de Coleta de Dados Graal 67, Projeto Piloto de Armazenamento de Energia Parceria USP-CPFL*. Grupo UNIFOGO, CPFL Soluções.
- GEPEA/USP. (2017). *Aspectos Relevantes do Estado da Arte e Fundamentos da Tecnologia de Baterias Eletroquímicas - Definição da Tecnologia e Pré-Projeto da Unidade Piloto*. Relatório Técnico Científico, São Paulo.
- GEPEA/USP. (2019). *RTC 5 - Relatório Técnico Científico 5 - Proposição da topologia a ser instalada*.
- GERADORES, S. G. (s.d.). Catálogo Comercial Grupo Gerador Diesel.
- GERADORES, S. G. (s.d.). Manual de comandos elétricos dos módulos ST2030/ST2040/ST2130.

- Global Market Insights*. (30 de outubro de 2023). Fonte: Global Market Insights: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/behind-the-meter-stationary-battery-storage-market>
- Google Maps*. (s.d.). Fonte: www.google.com.br/maps
- Grudzien Neto, J., & Shima, W. T. (julho/dezembro de 2015). Porque é tão difícil a integração entre os setores de energia elétrica e gás natural no Brasil? uma análise à luz da economia dos custos de transação. *Agenda Política*, 3 n.2, pp. 156-183.
- Halliday, D., Resnick, R., & Jearl, W. (2012). *FUNDAMENTOS DE FÍSICA - ELETRO MAGNETISMO VOLUME 3*. LTC.
- Hesse, H. C., Schimpe, M., Daniel, K., & Jossen, A. (18 de Novembro de 2018). Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids. *Energies - MDPI*.
- Hesse, H. C., Schimpe, M., Kucevic, D., & Jossen, A. (2017). Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids. *Energies - Open Access Journal of Energy Research, Engineering and Policy*.
- International Energy Agency. (30 de 10 de 2023). *Energy Statistics Data Browser*. Fonte: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>
- IRENA. (2017). *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2017). *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Koller, M., Borsche, T., Ulbig, A., & Andersson, G. (2015). Review of grid applications with the Zurich 1MW battery energy storage system. *Elsevier*, 128-135.
- Lawson, B. (s.d.). *The Electropaedia*. (Woodbank Communications Ltd) Acesso em 12 de Junho de 2019, disponível em <https://www.mpoweruk.com/life.htm>
- Losekan, L., & Tavares, A. (2020). *TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E POTENCIAL DE COOPERAÇÃO NOS BRICS EM ENERGIAS RENOVÁVEIS E GÁS NATURAL*. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA).
- Ministério do Meio Ambiente. (2016). *Acordo de Paris*. Acesso em 3 de Maio de 2017, disponível em Ministério do Meio Ambiente : <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>

- National Park Service. (s.d.). <https://www.nps.gov/alca/index.htm>.
- Obi, M., Jensen, S., Ferris, J. B., & Bass, R. B. (2017). Calculation of levelized costs of electricity for various electrical energy storage systems. *ELSEVIER*, 908-920.
- ONS. (2017). *Atuação do ONS sobre o SIN*. (Agência Nacional de Energia Elétrica) Acesso em 03 de Maio de 2017, disponível em Operador Nacional do Sistema Elétrico : <http://www.ons.org.br/atuacao/index.aspx>
- Peill-moelter, N. (19 de outubro de 2012). *Batteries Included: A Leaner And Greener Internet Using Smart Batteries*. Acesso em 1 de Abril de 2018, disponível em Akamai technologies: <https://blogs.akamai.com/2012/10/batteries-included-a-leaner-and-greener-internet-using-smart-batteries.html>
- Piratininga, C. (Maio/2018). Fatura de Energia Elétrica Unidade Consumidora 2036270780. Jundiaí.
- Princeton Power Systems. (2015). Alcatraz Island Micro-grid.
- Relva, S. G., Udaeta, M. E., Grimoni, J. A., & Galvão, L. C. (2015). Avaliação Comparada de Geração de Energia por Fontes Renováveis e não Renováveis nos Sistemas Elétricos. *ANAIS XXIII SNPTEE*, (pp. 1-9). Foz do Iguaçu.
- Rontek. (s.d.). <http://www.sta-eletronica.com.br/artigos/descarga-de-baterias>. Acesso em 2 de Agosto de 2018, disponível em <http://www.sta-eletronica.com.br/artigos/descarga-de-baterias>
- Soloveichik, G. (2011). Battery Technologies for Large-Scale Stationary Energy Storage. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*.
- The development of the natural gas transportation network in Brazil: recent changes to the gas law and its role in co-ordinating new investments. (2012). *Energy Policy*, 50 , pp. 601-612.
- Woodbank Communications Ltd. (s.d.). *The Electropaedia - Battery and Energy Technologies*. Acesso em 15 de Abril de 2018, disponível em The Electropaedia - Battery and Energy Technologies: <https://www.mpoweruk.com/index.htm>